



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ**

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

**VYUŽITÍ FRP VÝZTUŽE PŘI NÁVRHU BETONOVÝCH  
KONSTRUKCÍ**

APPLICATION OF FRP REINFORCEMENT IN THE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Barbora Kratochvílová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. FRANTIŠEK GIRGLE, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav betonových a zděných konstrukcí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Barbora Kratochvílová
<b>Název</b>	Využití FRP výztuže při návrhu betonových konstrukcí
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. František Girgle, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

---

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Teoretické a konstrukční podklady v nutném rozsahu v návaznosti na zadání.

Platné předpisy a normy (včetně změn a oprav), např.:

ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí;

ČSN EN 1991-1 až 7: Zatížení stavebních konstrukcí;

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby;

ČSN EN 206 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda;

fib Bulletin no. 40: FRP reinforcement in RC structures;

alternativně ACI 440.1R-15: Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars a/nebo CSA S806-12: Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers.

Další literatura dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Textová část bude obsahovat pojednání týkající se využití kompozitních materiálů při návrhu betonových konstrukcí a to v rozsahu dle zadání vedoucího práce. Dále, pro zadanou konstrukci (resp. její dílčí část), bude proveden statický výpočet a návrh vyztužení s využitím kompozitní výztuže.

Ostatní činnosti a případná zjednodušení zadání provádějte v souladu s pokyny vedoucího bakalářské práce. Práce bude zpracována v rozsahu vědomostí, které odpovídají znalostem posluchače bakalářského studijního programu.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady, studie

P2. Statický výpočet

P3. Výkresová dokumentace

Bakalářská práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá dvěma typy výztuží FRP výztuží a klasickou ocelovou výztuží. První část této práce je zaměřena na teoretické poznatky týkající se FRP výztuže. Tato část popisuje složení, vlastnosti, výrobu, trvanlivost a její návrhové vlastnosti z teoretického hlediska. V následující části je proveden návrh a posouzení konkrétního prefabrikovaného U dílce. Návrh a posouzení je provedeno ve dvou variantách, jak z FRP výztuže, tak i z ocelové výztuže.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

VLÁKNO, MATRICE, FRP VÝZTUŽ, KOMPOZITNÍ VÝZTUŽ, OCELOVÁ VÝZTUŽ, NEKOVOVÁ VÝZTUŽ, PREFABRIKOVANÝ DÍLEC

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with two types of reinforcement FRP reinforcement and generally used steel reinforcement. The first part of this thesis is focused on theoretical knowledge related to FRP reinforcement. There is described its composition, properties, production, durability and its design properties from a theoretical point of view. In the following part, the design and assessment of a specific prefabricated U part is performed. The design and assessment is performed in two variants from FRP reinforcement and steel reinforcement.

## **KEYWORDS**

FIBRE, MATRIX, FRP REINFORCEMENT, COMPOSITE REINFORCEMENT, STEEL REINFORCEMENT, NON-METALLIC REINFORCEMENT, PREFABRICATED PANEL

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Barbora Kratochvílová *Využití FRP výztuže při návrhu betonových konstrukcí*. Brno, 2021. 49 s., 48 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. František Girgler, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Využití FRP výztuže při návrhu betonových konstrukcí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 7. 5. 2021

---

Barbora Kratochvílová  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Využití FRP výztuže při návrhu betonových konstrukcí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 5. 2021

---

Barbora Kratochvílová  
autor práce

## Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Františku Girglemu, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, trpělivost, vstřícnost a čas, který mi věnoval. Dále bych také chtěla poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mě při studiu podporovali.

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	Historie .....	11
2.1	Počátky .....	11
2.2	Sovětský svaz a Rusko .....	11
2.3	Západ .....	11
2.4	Ostatní země.....	12
3	Složení.....	13
3.1	Matrice .....	13
3.2	Vlákno.....	14
3.2.1	Skleněná vlákna .....	14
3.2.2	Čedičová vlákna .....	15
3.2.3	Uhlíková vlákna.....	15
3.2.4	Aramidové vlákno.....	16
4	Typy kompozitních výztuží .....	17
5	Porovnání kompozitní a ocelové výztuže .....	18
6	Výroba .....	19
7	Fyzikálně mechanické vlastnosti .....	21
7.1	Fyzikální vlastnosti.....	21
7.1.1	Hustota .....	21
7.1.2	Teplotní roztažnost.....	22
7.1.3	Reakce výztuže na působení zvýšené teploty .....	23
7.2	Mechanické vlastnosti .....	23
7.2.1	Krátkodobé mechanické vlastnosti .....	23
7.2.2	Dlouhodobé mechanické vlastnosti .....	25
8	Trvanlivost FRP výztuže .....	30
8.1	Vliv alkality a vlhkosti daného prostředí .....	30
8.2	Teplotní namáhání.....	31
8.3	Koroze polymerní matrice .....	32
8.4	Efekt ultrafialového záření .....	32
8.5	Efekt zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů.....	32
9	Zásady návrhu konstrukcí s kompozitní výztuží .....	33
9.1	Základní ustanovení.....	33
9.2	Návrhová životnost staveb s kompozitní výztuží.....	33



9.3	Dílčí materiálové součinitele .....	34
9.4	Navrhování na základě zkoušek.....	34
9.5	Stanovení minimální krycí vrstvy.....	34
<b>10</b>	<b>Návrh betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží z hlediska MSÚ .....</b>	<b>35</b>
10.1	Návrh prvků na ohyb .....	35
10.1.1	Základní předpoklady návrhu prvku vyztuženého kompozitní výztuží.....	35
10.1.2	Stanovení únosnosti ohýbaného prvku a jeho porušení.....	35
10.1.3	Publikace <i>fib</i> Bulletin No.40 [15] .....	36
10.1.4	Mezní únosnost v ohybu .....	37
10.2	Smyk .....	38
10.2.1	Mechanismus přenosu smykového napětí u elementu vyztuženého kompozitní výztuží 38	
10.2.2	Smykové porušení v prvcích vyztužených FRP výztuží .....	40
10.2.3	Přístup k návrhu prvků při smykovém namáhání.....	41
10.2.4	Prvky bez smykové výztuže .....	41
10.2.5	Prvky se smykovou výztuží .....	42
<b>11</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>44</b>
	Seznam literatury .....	45
	Seznam obrázků .....	48
	Seznam tabulek.....	49

## 1 Úvod

Díky svým jedinečným vlastnostem se v průběhu let začala kompozitní výztuž dostávat do čím dál většího povědomí. Dostala se tak i do stavebnictví, kde došlo k jejímu aplikování do konstrukcí. Mezi její největší přednosti patří to, že se jedná o materiál, který nepodléhá korozi a má nízkou objemovou hmotnost a vysokou pevnost v tahu.

Cílem této bakalářské práce je využití FRP výztuže při návrhu betonových konstrukcí. Práce se skládá ze dvou částí, z části teoretické a praktické. První část se zabývá seznámením s kompozitní výztuží (FRP výztuží), jejím složením, rozdělením, vlastnostmi (fyzikálními i mechanickými), výrobou, trvanlivostí a jejím navrhováním z teoretického hlediska. Jsou zde také shrnuty její výhody i nevýhody oproti ocelové výztuži.

Při zpracování teoretické části jsem získala znalosti, které mi umožnily snáze pochopit a navrhnout konstrukci za použití GFRP výztuže.

Praktická část se zabývá návrhem a posouzením konkrétního prefabrikovaného U dílce – enrgokanálu. Návrh a posudek je proveden ve dvou variantách. První varianta se zabývá návrhem prefabrikovaného U dílce s klasickou betonářskou výztuží. Oproti tomu ve druhé variantě je návrh proveden za použití skleněné kompozitní výztuže (GFRP výztuž).

## 2 Historie

### 2.1 Počátky

Poprvé se s kompozitními materiály můžeme setkat kolem roku 1950. Hned od počátku své uplatnění našly ve strojírenství, následně pak v lodním, automobilovém a kosmickém odvětví. Nakonec také ve stavebnictví a to kolem 60. let 20 století [1]. Důvodů použití ve stavebnictví bylo hned několik. Hledala se vhodná náhrada za ocelovou výztuž, která díky svým vlastnostem nebyla vždy optimální, zejména pak kvůli své nízké odolnosti vůči korozi [2]. Kompozitní výztuž tím získala perspektivní uplatnění zejména u staveb mořských, silničních, s anti-magnetickými a dielektrickými vlastnostmi (medicínská centra, vědecko-výzkumné instituty) [1], [2]. Další motivací pro uplatnění kompozitní výztuže bylo, že používání oceli vyžadovalo legování pomocí železa a dalších kovů a omezená zásoba těchto ložisek [2]. Koncem roku 1970 byl proveden záměrný výzkum, jehož výsledkem byl vznik technických dokumentů popisující kompozitní výztuž. Až od roku 1980, se můžeme setkat s jejich širším uplatněním (díky zkvalitnění výroby) [1].

### 2.2 Sovětský svaz a Rusko

V 60. letech 20 století provedli sovětsí vědci testovací výrobu s úmyslem dosáhnout lepšího porozumění fyzikálně-mechanických vlastností kompozitní výztuže. Jednalo se o kompozitní výztuž se skelnými vlákny v syntetické pryskyřici epoxidového a polyesterové typu. Daným výzkumem se podařilo prokázat některé její technické vlastnosti [2].

V Sovětském svazu se sice nepodařilo zorganizovat rozsáhlou výrobu, ale kompozity se uplatnily při stavbě spousty konstrukcí. Například při stavbě elektrického vedení v Moskvě, Batumi, Stavropoli nebo Grodnu. Dále při stavbě skladů ve městech Rahačov a Červeň. Poté následovala výstavba mostů od klasických mostů vyztužených pomocí kompozitní výztuže, přes kombinaci kompozitní a ocelové výztuže až po první lepený dřevěný most s kompozitní výztuží, který byl vyhotoven po projektu specialistů z Chabarovské polytechnické univerzity [2].

Při prohlídkách mostů, které byly konstruovány jako pokusné stavby v letech 1975-1989 a kde bylo použito předpětí pomocí výztuží ze skleněných vláken se zjistilo, že za dobu jejich použití se efekt předpětí nezměnil [2].

Sovětský svaz a Rusko si ve vztahu ke kompozitní výztuži prošlo po určité časové období fázi klidu až v roce 2000 došlo k obnovení výzkumu výroby kompozitní výztuže. O jeho obnovení se zasloužily například některé univerzity, Jaroslavský závod kompozitů atd. [2].

### 2.3 Západ

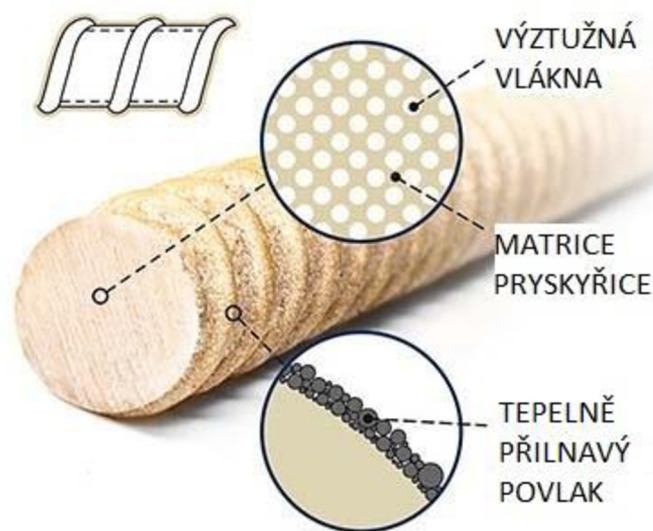
Z pohledu výroby se začala v Americe věnovat kompozitní výztuži pozornost v polovině 60. let 20 století. Na jejich vývoji v USA se podílela především společnost Marsahl-Vega Inc. Základem širokého uplatnění kompozitních materiálů bylo jejich použití v leteckém průmyslu a jejich vhodné vlastnosti jako lehkost a odolnost. Ve stavebnictví se využívala kompozitní výztuž při stavbách přístavních budov, mostů, medicínských center nebo vinného závodu. V současné době našla kompozitní výztuž velké uplatnění také v Kanadě při stavbě mostovek [2].

## 2.4 Ostatní země

Německo patřilo v Evropě mezi první země zabývající se kompozitní výztuží, kde byl postaven silniční most z předpjaté nekovové výztuže. Ani Asie a další východní země nezůstaly dlouho pozadu, už v polovině 90. letech 20. století, bylo v Japonsku více než 100 obchodních objektů s použitím kompozitní výztuže. Za jednoho z největších spotřebitelů kompozitních výztuží lze v současné době považovat Čínu, právě zde nachází kompozitní výztuž uplatnění ve většině nových staveb (průmyslových, mostních a spousty dalších) [2].

### 3 Složení

Kompozitní materiál je obecně takový materiál, který se vyrábí ze dvou nebo více složek s odlišnými vlastnostmi. Konkrétně kompozitní výztuže se skládá z matrice a výplňového materiálu, vláken. Toto spojení nám dává jedinečný produkt s jedinečnými vlastnostmi. Polymerní matrice je vytvrdnutý produkt, který je nesnadno hořlavý, vlhkvzdorný a chemicky i tepelně odolný. Vlákno je pružný materiál určený k vyztužování polymerních kompozitů. Nejčastější typy těchto vláken jsou: skleněná, čedičová, uhlíková, aramidová vlákna [3]. U kompozitní výztuže se můžeme setkat s několika druhy vnějšího povrchu, a to s ovinutím, s pískem a s profilem vytvořeným deformací výztuže [1]. Vnější povrchová úprava nekovové výztuže zajišťuje lepší soudržnost v betonu [4].



Obrázek 1: Výztuž [5]

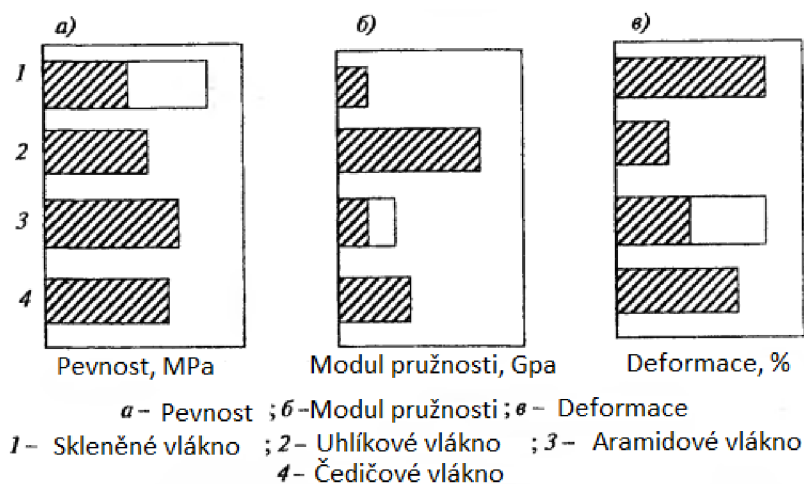
#### 3.1 Matrice

Matrice vytváří jeden celek monolitického materiálu, který obsahuje početná vlákna. Jednou z jejich hlavních funkcí je přenos sil na vlákna, dále ochrana vláken, ochrana proti mechanickému porušení a oxidaci. Musí být také odolná proti vlhku, teple a agresivnímu prostředí. Zároveň musí být také pevná a mít dielektrické vlastnosti. To vše závisí na druhu matrice [1].

Matrice polymerního kompozitu se skládá z termoreaktivní pryskyřice, která spadá do skupiny plastů takzvaných termosetů. Z termoreaktivní pryskyřice se stává po vytvrnutí nerozpustný, netavitelný materiál s trojrozměrnou strukturou. Patří sem epoxidové, vinylesterové, nenasycené polyesterové, fenolické a další druhy organických pryskyřic [3].

## 3.2 Vlákno

Zajišťuje tahovou sílu v kompozitní výztuži, která se skládá z orientovaných vláken a matrice. Vlákna tvoří zhruba 80 až 85% hmotnosti a jejich průměr se pohybuje od 8 až po 20 mikronů. Pevnost a schopnost přetvářet se nám určují mechanické vlastnosti vláken. Mezi nejčastější druhy vláken patří skleněná, čedičová, uhlíková a aramidová vlákna [6].



Obrázek 2: Porovnání mechanických charakteristik některých druhů vláken [6]

### 3.2.1 Skleněná vlákna

Jejich základní sloučeninou je  $\text{SiO}_2$  (oxid křemičitý). Výhodou skleněných vláken je jejich nízká tepelná vodivost, vysoká pevnost a nejedná se o tak ekonomicky nákladný materiál [4]. Skleněná výztuž při požáru nevyučuje jedovaté plyny a oproti uhlíkové výztuži má dobré elektroizolační vlastnosti [1]. Nevýhodou skleněných vláken je citlivost na vlhkost a zásadité prostředí. Také mohou být náchylné ke korozi pod napětím a k relaxaci napětí [1].

Nejčastěji používanými typy skleněných vláken ve stavebnictví jsou: E, S, A a AR. Vlákna typu E: jedná se o nejlevnější typ, který zároveň není odolný vůči kyselému prostředí. Typ S: má vyšší pevnost a modul pružnosti oproti jiným typům. Typ A: mají vysokou chemickou odolnost. Typ AR: jedná se o alkalicky odolná vlákna s použitím zirkonia [1], [6].



Obrázek 3: Hotový skleněný roving v roli (svitku) [7]

### 3.2.2 Čedičová vlákna

Bazanit, amfibolit, čedič a gabro-diabaz jsou horniny, které jsou si po chemické stránce blízké, což nám umožňuje výrobu čedičového vlákna ze všech těchto hornin. Čedičové vlákno má oproti skleněnému lepší fyzikálně-mechanické vlastnosti a je v podstatě levnější, jak uhlíkové. Mezi výhody čedičového vlákna patří schopnost zvukové izolace, ohnivzdornost, tepelná vzdornost a odolnost vůči chemickému působení. Výroba probíhá pomocí tavení čediče v tavících pecích při teplotě 1450 stupňů celsia a jeho protečení přes speciální zařízení [1].



Obrázek 4: Čedičový roving [8]

### 3.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou považována ve stavebnictví jakožto nejideálnější typ vláken, díky jejich cenným fyzikálně-chemickým a mechanickým vlastnostem. Mezi výhody uhlíkových vláken patří odolnost proti vysoké teplotě a činnosti světla a pronikajícímu záření, atmosférická odolnost, chemická odolnost k činitlům, ale také biologická odolnost. K dalším výhodám uhlíkových vláken patří, že jsou těžko hořlavá a mírně hydrofobická. Mají také elektrické vlastnosti, nemají sklon ke korozi, pouze k elektrochemické korozi při styku s ocelí. Uhlíková vlákna jsou výborná při vysoce opakovaném zatížení. Nevýhodou je, že mají jednu z nejvyšších cen ze všech známých typů [1].

Uhlíková vlákna se dělí podle meze pevnosti a modulu pružnosti na vlákna obecného účelu, vysokopevnostní, středního modulu, vysokého modulu a ultravysokého modulu [3].



*Obrázek 5: Uhlíkové vlákno [9]*

### 3.2.4 Aramidové vlákno

Celý název pro aramid je aromatický polyamid. Mezi jeho výhody patří vysoká pevnost v tahu, modul pružnosti, dielektrické vlastnosti a teplotuvzdornost. K jeho nevýhodám naopak patří citlivost na vlhkost, ultrafialové záření, ale také relaxace a koroze pod napětím. Aramidová vlákna se dobře zpracovávají textilně [1]. Důležité je zmínit, že aramidová vlákna mají velkou odolnost vůči zásadám oproti skleněným a čedičovým vláknům. Při vlivu 50% louhu sodného se pevnost aramidového vlákna sníží o 10% [6].

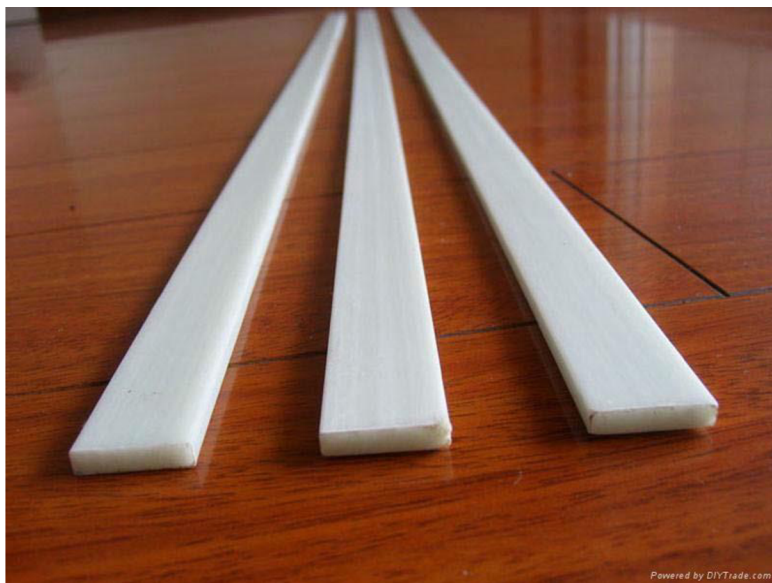


*Obrázek 6: Aramidové vlákno [10]*



#### 4 Typy kompozitních výztuží

Druhy kompozitních výztuží lze dnes uplatnit, jak pro vnější, tak pro vnitřní vyztužování. Lze je rozdělit na pruty, sítky, tkaniny, desky, pruhy (lamináty) a lana. Prutovou výztuž lze dále rozdělit na pravoúhlou, plošnou a kruhovou [1].



*Obrázek 7: Charakteristické typy průřezu prutů kompozitní výztuže [1]*

## 5 Porovnání kompozitní a ocelové výztuže

Tabulka 1: Technické vlastnosti kompozitní a kovové výztuže [11].

Kritérium	Nekovová skleněná výztuž	Nekovová čedičová výztuž	Kovová výztuž
Použitý materiál	Skleněné vlákno, svázané pryskyřicí	Čedičové vlákno, svázané pryskyřicí	Ocel 10 425 a atd.
Modul pružnosti	43 000 MPa	45 000 MPa	200 000 MPa
Pevnost v tahu	1200 MPa	1300 MPa	360 MPa (mez kluzu)
Poměrné prodloužení při přetržení	2,20%	2,20%	25%
Životnost	Minimálně 80 let		Podle stavebních norem
Odolnost proti korozi v agresivním prostředí	Odolná proti korozi, včetně k alkalickému prostředí betonu		Koroduje s uvolněnými produkty reze
Ekologie	Ekologická (má hygeno-epidemiologickou vazbu, neuvolňuje škodlivé a toxické látky)		Ekologická
Chování pod zatížením, závislost (napětí-deformace)	Přímka, pružně-lineární závislost		Křivka, tekutost pod zatížením
Elektrická vodivost	Neteplelně vodivá - dielektrická		Elektrická vodivost
Tepelná vodivost	Nízká tepelná vodivost		Tepelná vodivost
Oblast použití	Možnost použít ve všech typech konstrukcí		Podle stavební normy
Hustota	1.9 T/M <sup>3</sup>		7.6 T/M <sup>3</sup>

## 6 Výroba

Kompozitní výztuže můžeme vyrábět pomocí několika typů technologií například za použití pultruze nebo pultruze s ovíjením. Výsledkem však musí být perfektní spojení matrice a nosných vláken. Pultruzí lze vyrobit i jiné prvky než jenom výztuže, (prvky prutového tvaru) [4].

Proces pultruze můžeme rozdělit do následujících stádií [4],[12]:

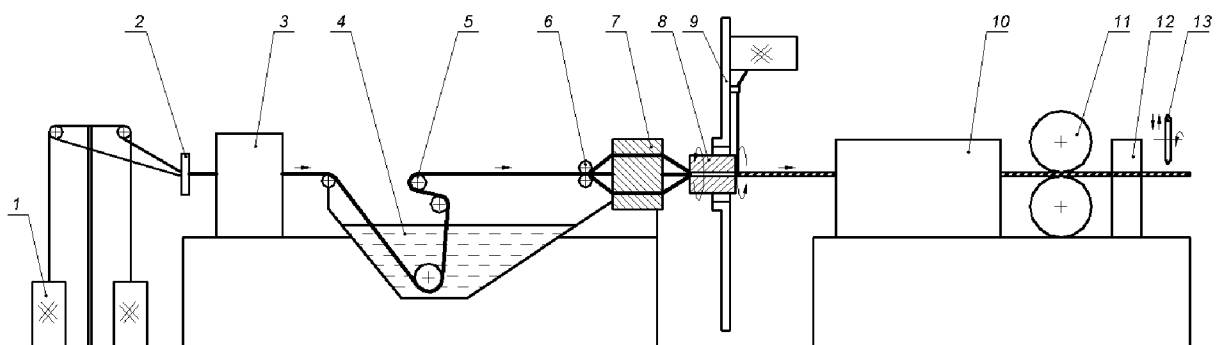
- Srovnání vláken
- Impregnace výztužného materiálu pryskyřicí
- Vtažení naimpregnovaného materiálu do tvarovače nahřáté formy (filera)
- Tažení výztužného materiálu
- Tvrdnutí materiálu ve formě (fileru) nebo např. v horkovzdušné peci
- Řezání hotového výrobku [4],[12]

Vlákna jsou impregnovaná polymerem, přičemž ten může být polyesterový, vinylesterový nebo epoxidový. Mohou do něj být přidána různá tvrdidla, urychlovače a další přísady [12].

V technologii pultruze s ovíjením dochází v první řadě k impregnaci vláken ve formě rovingů, které jsou následně pomocí tvarovače spojena do prvku o kruhovém průřezu. V posledním kroku jsou ovinuty materiálem, který může být buď odlišný, nebo stejný jako hlavní materiál výztuže [4].

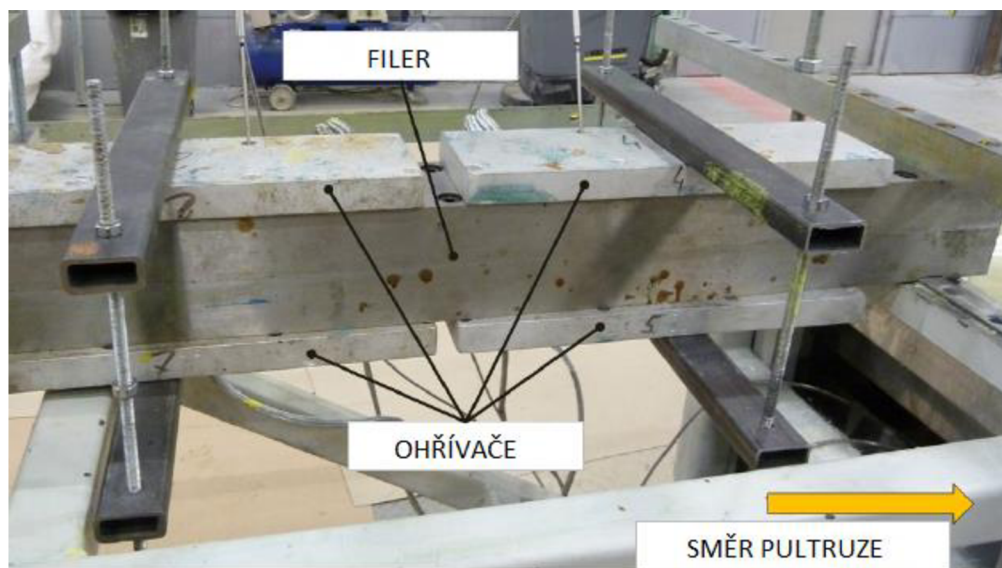
Další technologie výroby kompozitní výztuže je takzvaná „bezfilerná“ technologie. Rozdíl oproti pultruzi je v tom, že místo nahřátého tvarovače (filera) se používá takzvaná polymerní pec. Předtím než se výztuž dostane do polymerní pece musí projít tvarovačem, kde dojde k formování profilu jádra a odstranění přebytečného polymeru. Následně pak putuje do navíjecího zařízení a nakonec do pece. Podle způsobu ovinutí rozlišujeme tři typy: Ovinutí spirálovité (nidltruzie), kosočtverečné (pleintruzie) nebo trojúhelníkové (deltatruzie) [12],[13].

Ve srovnání s pultruzí je polymerizační pec významně delší. Kompozitní materiál nacházející se uvnitř se nedotýká stěn pece. Ohřev pece může probíhat pomocí trubkovitých elektrických ohřivačů nebo infračerveným zářením. V peci dochází v první případě k ohřevu vzduchu, v druhé případě dochází k tomu, že infračervené záření působí přímo na povrch kompozitu a zapříčiňuje jeho nahřátí [12],[13].



Obrázek 8: Schéma procesu pultruze a nidltruze. V procesu pultruze zařízení 8,9,12 není přítomno. 1) Cívka s rovingem, 2) Tvarující deska, 3) Žihací komora, 4) Impregnovací vana, 5) Natahovací zařízení, 6) Vytlačovací válce 7) Tvarovací zařízení, 8) Tvarovací válec, 9) Zařízení

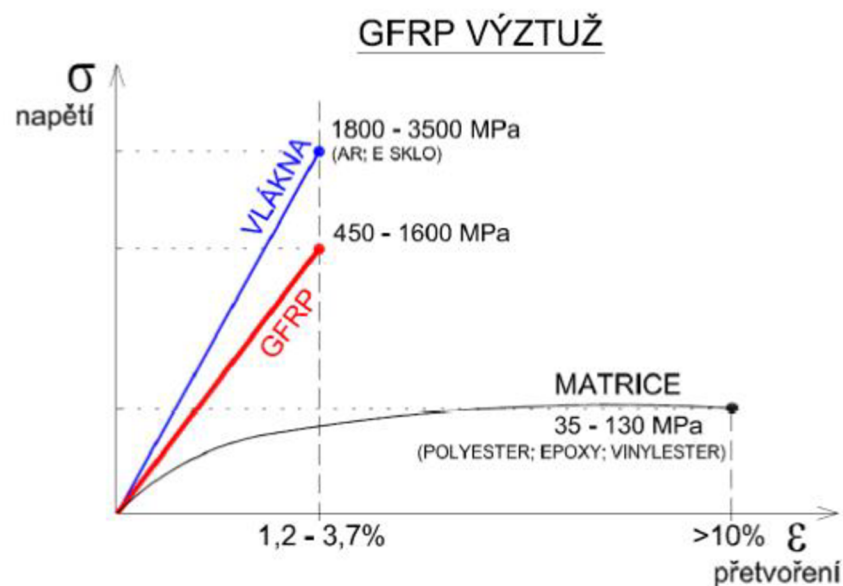
k spirálnímu navinutí, 10) filer (pultruze) nebo polymerní komora (nidltruzie), 11) tažné zařízení, 12) Uzel smotání obmotávajícího provazu (nidltruzie), 13) Zařízení na řezání [12].



Obrázek 9: Vnější vzhled pultruze [12].

## 7 Fyzikálně mechanické vlastnosti

Spojením vláken a matrice nám vzniká jedinečný produkt s jedinečnými vlastnostmi. Jejich směsný poměr, vlastnosti jednotlivých dílčích složek a postup výroby určují jejich fyzikálně mechanické vlastnosti. Také úroveň a typ zatížení, ale i prostředí, jeho teplota a vlhkost nám určují jejich přetvárné chování. Lze je také zařadit mezi ortotropní materiály, z důvodu jejich odlišných hodnot ve směru orientace vláken a vláken kolmých na ně. Pokud dojde k namáhání výztuže ve směru jejich vláken, chová se elasticky pouze do doby, dokud nedosáhne mezního napětí a výztuž se neporuší křehkým lomem. Ohyby výztuže u termosetických matric je třeba dělat v průběhu výroby, po vytvrzení výztuže již to není možné [4], [14].



Obrázek 10: Příklad idealizované závislosti napětí na přetvoření GFRP výztuže včetně základních materiálů kompozitu [4].

### 7.1 Fyzikální vlastnosti

#### 7.1.1 Hustota

Hustotu neboli objemovou hmotnost značíme  $\rho_f$ , určuje jí typ matrice a procentuální množství vláken. V porovnání s ocelí je hustota FRP výztuže čtvrtinová až pětinnová, díky tomu je s ní snadnější manipulace na stavbě. Jednou z jejich nevýhod však je, že je důležitá náležitá fixace výztuže v bedně, proti nevídanému vyplavení [4],[14].

Výslednou hustotu kompozitu můžeme zajistit pomocí takzvaného směsného pravidla, kde známe objemovou hmotnost dílčích komponentů kompozitu a pomocí objemového podílu dílčích složek určíme výsledek [4],[15].

$$\rho_f = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (7-1)$$

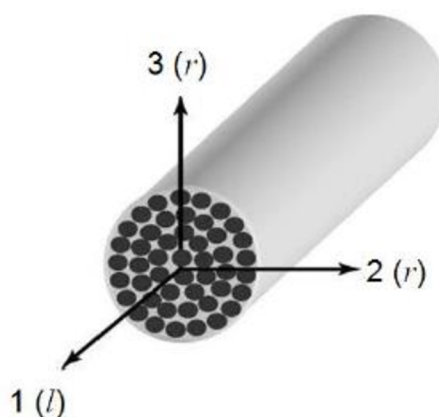
V tabulce můžeme vidět typické hustoty pro termosetické pryskyřice (při objemovém podílu vláken  $V_f = 0.5$  až  $0.75$ ) a následné porovnání s hustotou oceli. [15]

Tabulka 2: Typické hustoty při  $V_f=0.5$  až  $0.75$  [15].

Matrice	FRP			Ocel
	CFRP	AFRP	GFRP	
Polyesterová	1430-1650	1310-1430	1750-2170	7850
Epoxydová	1440-1670	1320-1450	1760-2180	
Vinylesterová	1440-1630	1300-1410	1730-2150	

### 7.1.2 Teplotní roztažnost

U FRP výztuže značíme součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha$ , jeho výsledná hodnota závisí na typu matrice a objemovém podílu vláken. Součinitel teplotní roztažnosti označujeme jako  $\alpha_{f,l}$  pro podélný směr (podle vlastností vláken) a  $\alpha_{f,r}$  pro příčný směr (podle vlastností matrice). Při běžných teplotách je součinitel teplotní roztažnosti FRP výztuže odlišný od betonu. V důsledku toho vznikají v konstrukci v podélném směru přídavné síly (zejména ve výztuži), které je potřeba zahrnout do výpočtu. Velikost těchto sil je závislá na vlastnostech výztuže [4], [14].



Obrázek 11: FRP výztuž a její osy 1 (l)-podélná osa, 2 (r) a 3(r)-příčná osa [4]

Tabulka 3: Koeficient tepelné roztažnosti pro ocel, beton a FRP výztuž (při  $V_f=0.5$  až  $0.75$ ) [15],[16].

SMĚR	KOEFCIENT TEPELNÉ ROZTAŽNOSTI ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )				
	OCEL	BETON	GFRP	CFRP	AFRP
Podélný $\alpha_{f,l}$	11,7	7,2 až 10,8	6 až 10	-9 až 0	-2 až -6
Příčný $\alpha_{f,r}$	11,7	7,2 až 10,8	21 až 23	74 až 104	60 až 80

Záporný koeficient tepelné roztažnosti naznačuje, že materiál se smršťuje se zvýšenou teplotou a roztahuje se sníženou teplotou [16].

### 7.1.3 Reakce výztuže na působení zvýšené teploty

Pokud dojde k vystavení FRP výztuže vyšším teplotám dochází k změnám jejich vlastností. To závisí zejména na skladbě a vlastnostech matrice, pak až na vlastnostech nosných vláken. Po dosažení teploty skelného přechodu matrice  $T_g$ , dojde k zásadním změnám fyzikálně mechanických vlastností [4]. Lze definovat následující případy [4],[15]:

- Dochází k vystavení kompozitní výztuže vůči nižším teplotám jak  $T_g$ . Důsledkem toho je, zachování celistvosti kompozitu. Dochází však k zrychlení stárnutí, dotvarování atd.
- (Při teplotách blízkých  $T_g$  jsou mechanické vlastnosti matrice výrazně sníženy a matice není schopna přenášet napětí z betonu na vlákna.)
- Dochází k překročení  $T_g$ . Důsledkem toho je, že kompozitní výztuž přestává přenášet smykové napětí a dojde k poklesu tahové pevnosti, modulu pružnosti a degradaci soudržnosti mezi betonem a výztuží. Ve vyztuženém betonovém prvku mohou vznikat nadlimitní průhyby a šířky trhliny. Jestliže dojde při vysoké teplotě k tavení nosných vláken nebo narušení kotvení dochází k celkovému selhání konstrukce [4],[15].

V  $T_g$  dochází k přechodu mezi měkkým pružným stavem polymerní pryskyřice a jejím tužším nebo sklovitým stavem [15].

Proto někteří autoři pro návrh konstrukce z kompozitní výztuže doporučují, aby výztuž měla hodnotu  $T_g$  o 30°C vyšší než je maximální než je maximální očekávaná provozní teplota konstrukce [15].

## 7.2 Mechanické vlastnosti

### 7.2.1 Krátkodobé mechanické vlastnosti

#### 7.2.1.1 Chování FRP výztuže v tahu

Ve směru hlavní podélné osy jsou vlastnosti FRP výztuže dány podle typu a vlastností vláken, jejich orientací a množstvím v průřezu výztuže. Velký vliv má také způsob výroby, skladování produktu a taktéž velikost průřezu výztuže [4].

Při použití technologie výroby pultruze, vykazuje FRP výztuž obvykle nejvyšší tahovou pevnost a modul pružnosti při namáhání ve směru osy vláken. Při odklonu směru namáhání od podélné osy způsobuje tento odklon snížení únosnosti výztuže. Při odklonu výslednice směru namáhání od osy větším než cca 10 až 15° únosnost výztuže dramaticky klesá. Z tohoto důvodu je výhodné navrhnout výztuž namáhanou pouze centrickým tahem. V opačné situaci dochází k odklonu směru namáhání od podélné osy výztuže a tento faktor je nutné při určení únosnosti kompozitní výztuže zohlednit [4],[14].

FRP výztuže z termosetových pryskyřic nelze po vytvrzení matrice dále ohýbat, došlo by k jejímu porušení. Při požadavku na dodávku ohýbaných prutů je toto nutné provést již při výrobě. Z důvodu nehomogenity rozprostření vláken, jejich nestejněměrného využití při vnášení, je nutno při návrhu ohýbané výztuže uvažovat s redukcí tahové pevnosti na cca 40-50% původní hodnoty přímého prutu. Výsledná hodnota je zde závislá především na poměru poloměru ohybu ku průměru výztuže [4], [14].

Základními charakteristikami popisujícími krátkodobé chování FRP výztuže v tahu jsou [4],[14]:

- Modul pružnosti  $E_{f,l}$  (uvažovaný obvykle ve střední hodnotě)

- Mezní pevnost v tahu  $f_{f,l}$  (střední, charakteristická, návrhová)
- Mezní poměr přetvoření  $\varepsilon_{f,l}$  odpovídající dané pevnosti v tahu [4], [14]

Tabulka 4: Tahové charakteristiky (při  $V_f=0.5$  až  $0.75$ ) [15].

VLASTNOST	Materiál			
	GFRP	CFRP	AFRP	OCEL
Modul pružnosti (podélný) [Gpa]	35 - 60	100 - 580	40 - 125	200
Mezní napětí v tahu (podélný) [Mpa]	450 - 1600	600 - 3500	1000 - 2500	450 až 700
Mezní přetvoření v tahu (%)	1.2 - 3.7	0.5 - 1.7	1.9 - 4.4	5 až 20

### 7.2.1.2 Chování FRP výztuže tlaku

Dnes se ještě stále nedoporučuje uvažovat při návrhu betonových konstrukcí únosnost v tlaku FRP výztuže. Chování v tahu a tlaku FRP výztuže je odlišné. V tlaku je dosahováno obecně nižších modulů pružnosti i mezních pevností. Pokud FRP výztuž vystavíme podélnému stlačení, může dojít k příčnému porušení v tahu, smykovému selhání nebo vzpěru vláken v matici. Způsob selhání závisí na typu vlákna, objemovém množství vlákna a také na typu matrice. Hodnoty pevnosti v tlaku jsou velmi závislé na geometrii vzorku a zkušební metodě. Z hlediska popisu dlouhodobého chování FRP výztuže v tlaku nejsou ve světě k dispozici relevantní údaje, které by umožňovaly bezpečný návrh betonové konstrukce s tlačnou výztuží. Jednou z výjimek je norma [17], která uvádí zásady návrhu tlačných betonových prvků vyztužených touto výztuží [4], [14],[15],[16].

### 7.2.1.3 Chování FRP výztuže ve smyku

U kompozitní výztuže rozlišujeme dva základní typy: porušení smykem, takzvaný interlaminární (podélný) a příčný smyk (střih). Podélné smykové porušení pro zabudovanou kompozitní výztuž v konstrukci není kromě porušení kotevní oblasti při tažení výztuže tak pravděpodobné. Oproti tomu častější je případ příčného smykového porušení výztuže takzvaně střihem. Zde se vychází z předpokladu při určení mezního napětí ve smyku  $f_{fs}$ , že v příčném řezu výztuže nevznikají normálová napětí a v posuzovaném průřezu existuje stav čistého smyku – výztuž je ustřížena [4].

Při smykovém namáhání je chování kompozitní výztuže vždy řízeno vlastnostmi matrice, nelze zde vyloučit sekundární vliv použitých vláken a závislost výsledné pevnosti modulu pružnosti. Je zde pravděpodobnost, že u výztuže s vyšším modulem pružnosti bude dosaženo vyšší mezní stříhové odolnosti [4]. Na výsledek má také vliv orientace vláken. Zlepšení stříhových vlastností můžeme dosáhnout pomocí ovíjení nebo oplétání vláken ve směru odklonu mimo hlavní osu [4], [15].

Při návrhu výztuže namáhané střihem musíme vycházet z hodnot dodaných od výrobce, který musí uvést způsob stanovení hodnot. Toto vše je potřeba z důvodu přihlédnutí na nedostatek relevantních zdrojů. Nelze tedy bezpečně vyvozovat na dlouhodobé chování výztuže ve střihu, což je třeba při návrhu vzít v úvahu [4].



#### 7.2.1.4 Soudržnost FRP výztuže s betonem

Soudržnost FRP výztuže s betonem je jedním z nejdůležitějších aspektů návrhu. Proces přenosu zatížení z betonu do výztuže ovlivňuje chování konstrukce (průhyb, šířky a vzdálenosti trhlin, potřebnou minimální tloušťku krycí vrstvy a zejména nutnou kotevní délku). Soudržnost je dána a zejména ovlivněna těmito faktory – povrchovou úpravou výztuže, mechanickými charakteristikami samotné výztuže a také vnějšími podmínkami (mohou mít za následek negativní ovlivňování konstrukce) [4], [14],[16].

Soudržnost při kotvení výztuže v betonu je zajištěna [4], [14], [16]:

- Adhezí povrchu výztužné vložky k betonu (přenos smykových sil ve styku dvou povrchů bez očividného pohybu)
- Třením při posunu mezi výztuží a okolním betonem
- Mechanickým zaklesnutím nerovností povrchu výztuže do okolního betonu [4], [14],[16]

Při prováděném výzkumu bylo zjištěno, že oproti klasické výztuži je chování FRP výztuže v soudržnosti odlišné s rozdílným způsobem porušení. Zejména v tom, že při porušení nemusí hrát roli třída betonu. Jsou dva způsoby porušení FRP výztuže, a to přetržením nebo vytržením z betonu, což zapříčiňuje nízká smyková únosnost matrice [4].

Nutná je odpovídající povrchová úprava pro zabezpečení dostatečné soudržnosti betonu a výztuže. Vhodné povrchové úpravy jsou pískování, ovinutí vystupujícími vlákny, žebírka a apod. Nevhodné je použití hladké výztuže bez povrchové úpravy. Každá povrchová úprava může mít své výhody a nevýhody, například opískování má menší pokluz než žebírková úprava [4], [14].

Při návrhu je nutné, aby dodavatel pro soudržnost FRP výztuže a betonu specifikoval údaje a metodiky zkoušky. Existuje několik zkoušek pro zjištění soudržnosti s betonem: pull-out testy, prstencové pull-out testy, zkoušky soudržnosti při stykování výztuže přesahem, nosníkové zkoušky [4], [18].



Obrázek 12: Povrchově upravené výztuže [19]

#### 7.2.2 Dlouhodobé mechanické vlastnosti

FRP výztuž se oproti ocelové výztuži liší v mnoha vlastnostech, pokud jde o jejich dlouhodobé vlastnosti. Vzhledem k bezpečnosti je nutné tyto vlastnosti zohlednit při návrhu.

Nejdůležitějším problémem FRP výztuže, co se týká jeho dlouhodobých vlastností je: porušení při dotvarování (creep rupture), relaxace a únava [4], [15].

### 7.2.2.1 Porušení při dotvarování

Dotvarování výztuže můžeme také nazvat anglickým názvem „creep“. K dotvarování dochází při vystavení výztuže dlouhodobému působení zatížení. FRP výztuže vykazují přetvoření v čase, což může vést k jejich náhlému selhání, takzvanému „creep rupture“. Důležitým faktorem, který je nutný pozorovat kromě přetvoření, je také dlouhodobá tahová pevnost [4], [20].

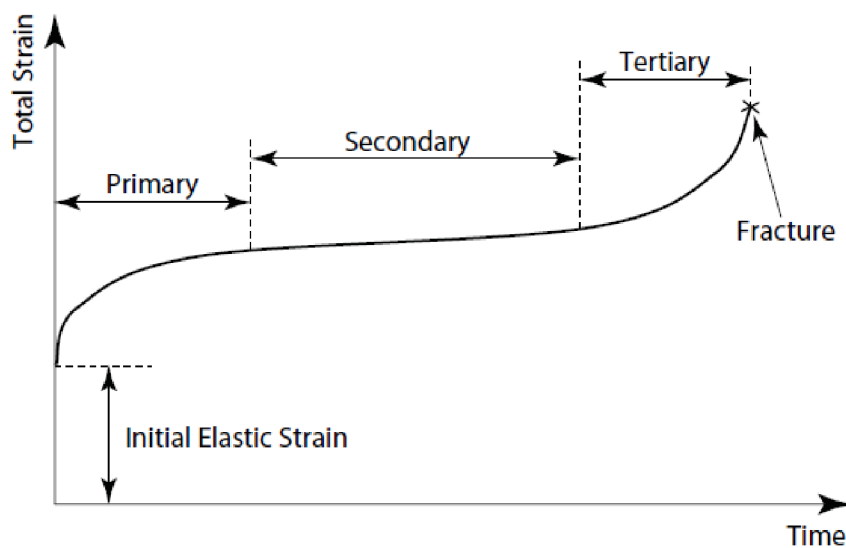
Proces dotvarování v čase má tři fáze (lze vidět na obrázku 13) [4], [15], [20]:

- 1. Fáze: Na jednotlivá vlákna je rozneseno zatížení z celého kompozitu. Pokud budeme uvažovat homogenní průřez, můžeme počáteční přetvoření  $\varepsilon_0$  vypočítat:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_{fL}} = \frac{\sigma}{E_{fL} \times V_f + E_m \times (1 - V_f)} \quad (7-2)$$

$E_{fL}$  = modul pružnosti nosných vláken,  $V_f$  = podíl vláken v myšleném jednotkovém průřezu,  $E_m$  = modul pružnosti matrice. K dotvarování matrice dochází při vnesení zatížení a přerozdělení účinkujícího napětí z matrice pouze na nosná vlákna. Dojde k postupné redukci (u většiny polymerních materiálů je lineární vzhledem k logaritmu času) příspěvku matrice na celkový modul kompozitní výztuže, což má za následek zvýšení přetvoření. Pro nízké hladiny přetvoření je redistribuce napětí z matrice do vláken vratná. Při následném odtížení vzorku dochází k postupnému vymizení přetvoření vyvolaného dotvarováním kompozitu, zejména u kompozitu s vysokým podílem vláken.

- 2. Fáze: Takzvaně stabilní, dochází zde k pozvolnému nárůstu přetvoření v dlouhém časovém úseku. Celý proces řídí zejména nosná vlákna. V optimálním stavu by se navržená kompozitní výztuž měla v této oblasti pohybovat celou dobu její životnosti.
- 3. Fáze: Zde je znázorněný prudký nárůst deformace, který má za výsledek křehké selhání vláken kompozitu. Aby se výztuž nedostala do třetí fáze a nedošlo tak k neočekávanému přetržení výztuže a tím zhroucení konstrukce, je nutné definovat hodnoty dlouhodobě působícího zatížení, takzvaně poměr mezi dlouhodobě působícím zatížením ke krátkodobé únosnosti [4], [15], [20].

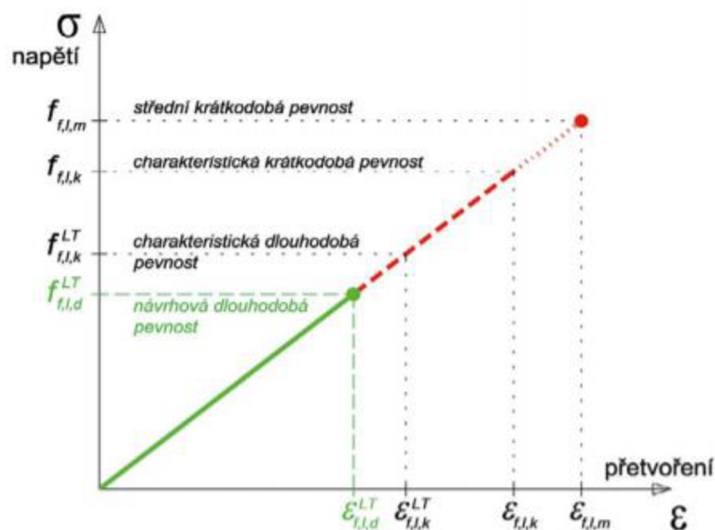


Obrázek 13: Křivka přetvoření během dotvarování [15]

Životnost FRP výztuže roste, jestliže klesá poměr mezi dlouhodobě aplikovaným zatížením a jednorázovou odolností. Vliv na to má složení kompozitní výztuže, objemový podíl vláken a jejich typ a také způsob zatížení [14].

#### 7.2.2.2 Stanovení dlouhodobé a krátkodobé pevnosti

Mezi logaritmem času a dlouhodobou tahovou pevností (pevnost při přetržení vlivem dotvarování) je lineární závislost pro všechny úrovně aplikovaného zatížení [4].



Obrázek 14: Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže pro tahovou pevnost [20]

Podle hladiny zatížení lze rozlišit [4]:

- Nízká hladina zatížení, výztuž je zde schopna odolávat desítky let
- Vysoká hladina zatížení, která se blíží mezní krátkodobé tahové pevnosti vzorku, zde dochází k velmi rychlému porušení vlivem dotvarování, které se pohybuje se v řádu jednotek hodin [4].

Nejen zatížení, ale také vliv okolního prostředí nám ovlivňuje dlouhodobou tahovou únosnost. Abychom stanovili dlouhodobé tahové charakteristiky, je nutné zvolit vhodný součinitel, který zredukuje krátkodobou únosnost s ohledem na očekávané okrajové podmínky, kterým bude výztuž vystavena po celou dobu životnosti stavby. Pro určení součinitele musíme zohlednit zejména: prostředí (vnější, vnitřní, teplotu, pH, vlhkost), geometrii vyztuženého prvku, typ působícího zatížení, požadovanou životnost, materiál navržené kompozitní výztuže (vlákna, matrice, povrchová úprava) [20].

Doporučené limity pro kompozitní výztuž z hlediska omezení dlouhodobě působícího zatížení jsou uvedeny v Tabulka 5 [4].

Tabulka 5: Stanovení dlouhodobé návrhové pevnosti dle různých návrhových podkladů [4]

REDUKCE DLOUHODOBÉ ÚNOSNOSTI				
Norma / Směrnice	Prostředí	Typ výztuže		poznámka
		GFRP	CFRP	
ACI 440.1R-15	Suché	$0,2 \times C_{E f_{fl,d}}$ $C_E = 0,8$	$0,55 \times C_{E f_{fl,d}}$ $C_E = 1,0$	Jako výchozí uvážena tzv. zaručená tahová pevnost, tj. cca návrhová hodnota dle EN 1990 (0,1% kvantil)
	Vlhké	$0,2 \times C_{E f_{fl,d}}$ $C_E = 0,7$	$0,55 \times C_{E f_{fl,d}}$ $C_E = 0,9$	
CSA S806-12	-	$0,25 \times f_{fl,d}$	$0,65 \times f_{fl,d}$	
fib MC 2010	-	$0,3 \times f_{fl,k} / \gamma_f$	$0,8 \times f_{fl,k} / \gamma_f$	$\gamma_f = 1,25$
CNR-DT 203/06	Suché	$0,3 \times \eta_a f_{fl,k}$ $\eta_a = 0,8$	$0,9 \times \eta_a f_{fl,k}$ $\eta_a = 1,0$	
	Vlhké	$0,3 \times \eta_a f_{fl,k}$ $\eta_a = 0,7$	$0,9 \times \eta_a f_{fl,k}$ $\eta_a = 0,9$	
fib Bulletin No.40	-	$f_{fl,k} / (\eta_{env,t} \gamma_f)$ $\eta_{env,t} \approx 1,1 + 3,0$ ; $\gamma_f = 1,25$		Přesný postup viz odstavec 3.4.2
JSCE	-	$= 0,8 \times$ charakteristická hodnota dlouhodobé pevnosti určené ze zkoušek		$\leq 0,7 \times f_{fl,k}$

Omezení bývají nejen přísná, ale také pro mnoho kompozitních výztuží znehodnocující, především pro GFRP. Jednotlivé modely navíc ukazují rozptyl získaných hodnot [4].

### 7.2.2.3 Stanovení mezního napětí při dlouhodobém namáhání FRP výztuže podle fib Bulletinu no.40 [15].

Fib Bulletin no.40 bere v úvahu parametry ovlivňující hodnotu mezního přípustného napětí jako je vlhkost, teplota a požadovaná délka životnosti konstrukce. To napomáhá ke stanovení přesnější hodnoty dlouhodobé únosnosti vypovídající o podmínkách, kde daná výztuž bude umístěna [4], [15].

Návrhovou dlouhodobou pevnost v tahu pro požadovanou životnost konstrukce, lze určit pomocí vztahu:

$$f_{f,l,d}^{LT} = \frac{f_{f,l,d}}{\eta_{env,t}} \quad (7-3)$$

$\eta_{env,t}$  = redukční součinitel zohledňující dlouhodobé účinky prostředí. Takzvaný poměr mezi krátkodobou a dlouhodobou pevností kompozitní výztuže v daném prostředí.

Podklad [15] uvádí dva vztahy, pomocí kterých lze stanovit redukční součinitel  $\eta_{env,t}$  [4], [15]:

- Pokud je známá experimentálně stanovená hodnota napětí  $f_{f,l,d}^{1000h}$ , (což je takzvané napětí, kterým musí být výztuž zatížena, aby došlo k jejímu porušení v horizontu 1000 hodin). Součinitel lze stanovit z tohoto vztahu (pokud je známá hodnota napětí a nepochází z tepelně urychleného testu):

$$\eta_{env,t} = \frac{f_{f,1,k}}{f_{f,1,k}^{1000h}} \cdot \frac{1}{((100 - R_{10})/100)^n} \quad (7-4)$$

- Pokud při porušení v 1000 hodinách hodnota mezního zatížení známá není:

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{(((100 - R_{10})/100)^{n+2})} \quad (7-5)$$

$R_{10}$  = Redukce tahové pevnosti v procentech za logaritmickou dekádu. Získá se pomocí degračních testů při zohlednění vlivu okolního prostředí. Exponent  $n$  je složen ze čtyř dílčích členů:  $n_{mo}$  = vlhkost prostředí, místa zabudování výztuže,  $n_T$  = teplota prostředí,  $n_{SL}$  = předpokládaná životnost konstrukce,  $n_d$  = případná rozdílnost průměru výztuže oproti testovanému vzorku [4],[15].

#### 7.2.2.4 Únava

Únavu můžeme popsat jako degradaci celistvosti materiálu, kterou způsobuje velký počet opakujících zatěžovacích cyklů. Z hlediska mechanických vlastností dochází ke snížení pevnosti a modulu pružnosti. Proto se u únavy pro cyklické zatížení, můžeme setkat s pojmy jako je únavová pevnost či tuhost nebo také takzvaný únavový limit, který nám určuje napětí, po kterém můžeme výztuž cyklicky namáhat, aniž by došlo k jejímu porušení [4], [15].

Poškození únavou může nastat na mnoha místech v celém prvku, jak v matici (trhliny, prasknutí), tak i v nosných vláknech (přetržení). Mohou vznikat také spojité trhliny na styku matrice a nosných vláken, takzvaná delaminace. V případě únavového chování více závisí na typu matrice, jak na typu nosných vláken. Rovněž faktory prostředí jako je vlhkost, teplota, apod. mají významný vliv na únavové chování prvku. Ze všech FRP výztuží, je CFRP výztuž

nejméně náchylná na únavu. Avšak v porovnání s ocelovými výztužemi jsou GFRP výztuže k únavě náchylnější [4], [15], [16].

## 8 Trvanlivost FRP výztuže

Dlouhodobé vlastnosti kompozitní výztuže nám ovlivňují tři základní prvky, a to jsou vlákna, matrice a rozhraní mezi vláknem a matricí. Každý prvek je jinak náchylný na různá prostředí, jimž je vystaven, ale i přesto by spolu měly fungovat po celou dobu životnosti kompozitní výztuže [15]. FRP výztuže jsou vystaveny nejenom přímému, nepřímému, ale také enviromentálnímu zatížení. Proto musíme zohlednit podmínky spolehlivosti, jejich počáteční a dlouhodobé mechanické vlastnosti, ale také dlouhodobé účinky prostředí. Mezi vlivy okolního prostředí může patřit například vlhkost, vodné roztoky, tepelné účinky (vysoká teplota, zmrazovací a rozmrazovací cykly), dlouhodobé a únavové zatížení, UV záření, požár, alkalické nebo kyselé roztoky. Což může vést k procesu porušení, jako nasákavosti a jejímu vlivu na fyzikální a mechanické vlastnosti, dotvarování a relaxaci napětí, únavě [4], [16].

Fyzikální, mechanické a chemické účinky prostředí snižují dlouhodobou pevnost FRP výztuže. Vliv na počáteční a dlouhodobou pevnost výztuže má také způsob její výroby, průměr výztuže, povrchová úprava, typ vláken a matrice. Z toho vyplývá, že nám jedna hodnota součinitele vyjadřujícího velikost dlouhodobé pevnosti odvozené z počáteční pevnosti dostatečně nevyjadřuje údaj platný pro všechny typy a průměry kompozitní výztuže. V zemích patřících do Evropské unie bylo dohodnuto, že návrh na enviromentální zatížení bude součástí stavebně technického osvědčení výrobce a ne norem. Pro každý materiál budou v normě pro navrhování kompozitní výztuže definovány pouze obecné a bezpečnostní charakteristické hodnoty. Kritéria uvedená v stavebně technickém osvědčení mají přednost před obecnou směrnicí [4].

Trvanlivost FRP výztuže nám zajišťuje zejména matrice, která představuje ochranou složku pro vlákna. Z tohoto hlediska musí matrice ve výztuži dobře obalit vlákna, nesmí zde být trhliny, dutiny, musí dojít k dobrému vytvrzení, proto je důležitý správný výběr matrice i vláken [15].

### 8.1 Vliv alkality a vlhkosti daného prostředí

Jedná se o jeden z hlavních problémů kompozitní výztuže. Po vystavení kapalinám, je degradace kompozitní výztuže úměrná rychlosti vstřebání tekutiny. Účinek vlhkosti nebo zásaditého roztoku může způsobit snížení pevnosti a tuhosti kompozitní výztuže [4].

Pro degradaci je zásadní vlhkost prostředí (přítomnost vody). Pokud dojde na rozpuštění alkálii ve vodě, může tak dojít k poškození styku vláken a matrice, což vede k zhoršení vlastností v podélném směru [20].

Jedny z méně citlivých vláken na alkálie jsou vlákna uhlíková, následně pak aramidová. Za to mezi citlivější vlákna na alkalické prostředí můžeme považovat vlákna skleněná. Vliv alkálii způsobí pokles jejich mechanických vlastností. Základní ochranou proti alkáliím u skleněných vláken je matrice. Ta by neměla být polyesterová, ale vinylesterová nebo epoxidová [20], [4], [15].

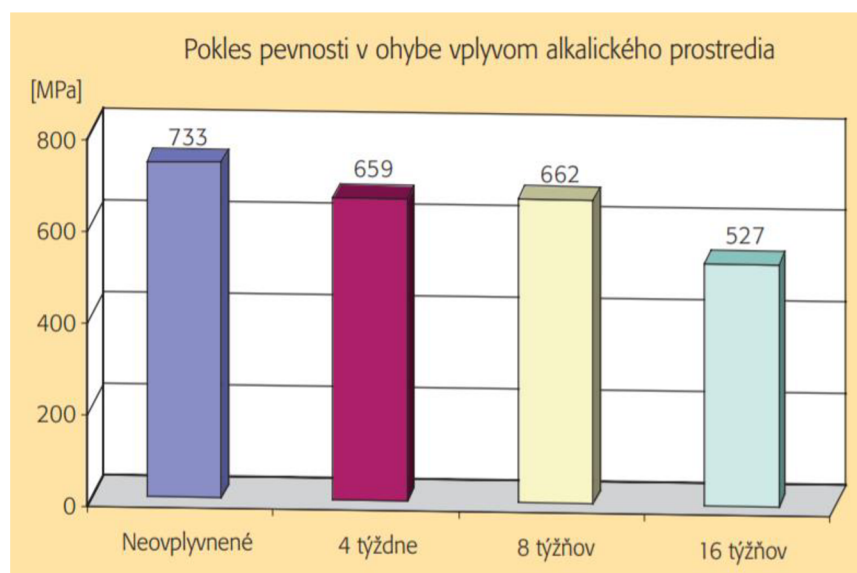
V betonu vzniká hydroxid vápenatý a další hydratační produkty, pokud dojde k hydrataci betonu. Vodný roztok (jeho pH mezi 10,5 až 13,5) jenž se nachází v pórech a přítomnost

alkalických iontů, nám způsobují agresivní cementové prostředí betonu pro GFRP výztuž. Čím je hodnota pH nižší, tím nižší je i agresivita betonu vůči GFRP výztuži. Toho můžeme dosáhnout pomocí cementu s částečnou náhradou portlandského slínku v cementu pomocí příměsí druhého typu. Při kombinaci hydratačních produktů, alkalického prostředí a vlhkosti může dojít k poškození skleněných vláken [4], [21].

K poškození vláken může dojít kombinací dvou degradačních procesů [4]:

- V alkalickém prostředí, chemickou korozi sklených vláken
- Mezi jednotlivými vlákny, koncentrací a zvětšováním objemu hydratačních produktů [4]

Dělají se urychlené zkušební testy na prozkoumání trvanlivosti kompozitní výztuže. Na proces simulovaného stárnutí se použije zvýšená teplota a vysoký obsah alkálií. Podle některých výzkumů nám pomocí simulovaného stárnutí může alkalické prostředí způsobit snížení pevnosti GFRP výztuže až do 70% z krátkodobé pevnosti v závislosti od typu matrice. Výsledky urychlených zkoušek je proto nutné porovnat s výsledky dlouhodobých zkoušek ve skutečném prostředí [21], [4].



Obrázek 15: Pevnost v ohybu GFRP výztuže  $\varnothing$  16 mm vystavené působení alkalickému prostředí [21]

Nedokonalá výroba a tahové napětí může být příčinou vzniku vyššího počtu pórů, kazů, mikrotrhlin, a to v oblasti, kde vlákna nejsou dostatečně obalena pryskyřicí. Tyto vady nám umožňují průnik alkalických iontů a vlhkosti k vláknům, což vede k porušení styku vlákno/matrice [4].

## 8.2 Teplotní namáhání

Při návrhu musíme zohlednit vystavení prvku na osluněnou část konstrukce či nikoliv. Změna teplotních podmínek prostředí má za důsledek změnu fyzikálně mechanických vlastností kompozitní výztuže. K tomu dochází zejména v polymerní matrici. Podle doby,

kteřou působí teplota na polymerní matriči rozlišujeme dva typy vlivů, a to dlouhodobý a krátkodobý. Krátkodobý vliv můžeme charakterizovat, jako fyzikální z důvodu vratného děje způsobené návratem teploty. Oproti tomu při dlouhodobém vlivu dojde k takzvanému stárnutí, což je nevratná chemická změna. Mezi nejdůležitější hodnoty tedy patří: teplota skelného přechodu, teplotní roztažnost a teplotní vodivost [4].

### 8.3 Koroze polymerní matrice

Koroze polymerní matrice závisí na jejím chemickém složení a vazbě mezi stavebními prvky makromolekul. Termosetové polymery, které se používají pro kompozitní výztuž nám mohou degradovat, jak po fyzikální, tak i po chemické stránce [4].

- Fyzikální koroze polymerní matrice: důsledkem je změna jejich vlastností, přičemž nedojde k žádné chemické reakci.
- Chemická koroze polymerní matrice: důsledek je rozštěpení vazeb v polymeru pomocí chemické reakce s prostředím. To může způsobit ve většině případů nevratné reakce, jako změkčení, delaminace, zkrěhnutí, spálení, tvorba bublinek nebo odbarvení polymeru. Pomocí kvalitního vytvrzení polymeru je možné tyto účinky zmírnit [4].

### 8.4 Efekt ultrafialového záření

Důsledek působení ultrafialové záření na kompozitní výztuž je žloutnutí a křehnutí matrice, což zapříčiňuje štěpení kovalentní vazby organických polymerů. Pro zabránění tohoto jevu se do polymerní matrice přidávají UV stabilizátory. K poškození UV zářením dochází při procesu skladování, jakmile je kompozitní výztuž vložena do betonu je tomuto jevu zabráněno [4].

### 8.5 Efekt zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů

Důsledkem rozmrazovacích a zmrazovacích cyklů jsou trhliny v betonu, díky nimž získávají roztoky snadnější přístup ke kompozitní výztuži. Tyto roztoky nám mohou způsobit degradaci polymerní matrice. V případě, že nedojde k navýšení vlhkosti při procesu zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, nedochází k až tak podstatným změnám mechanických vlastností kompozitní výztuže [4].



## 9 Zásady návrhu konstrukcí s kompozitní výztuží

V tomto oddíle se zabýváme zejména zásadami pro návrh staveb s kompozitní výztuží a základními informacemi pod vlivem ohybového namáhání. Porušením betonu a výztuže můžeme dosáhnout mezní únosnosti betonu. Tyto informace jsou důležité pro návrh konstrukcí, kde může dojít k ohrožení lidského života, přes materiálové škody, ale také pro konstrukce, u nichž to v případě poruchy nehrozí [4].

### 9.1 Základní ustanovení

Při vyztužování konstrukce kompozitní výztuží je nutné, aby byla stejně jako ocelová výztuž navržena v souladu s platnými normami, zejména s normou ČSN EN: 1990 [22] a ČSN EN 1992-1-1 [23]. Kromě výše zmíněných norem může být konstrukce navržena i dle doporučení [15], [16],[17]. Při použití zahraničních návrhových dokumentů musíme vzít v úvahu rozdílné pojetí spolehlivosti daného předpisu. Zejména pak se to týká zatížení, stanovení návrhových hodnot, odolnosti. Avšak vždy musí být dodržena požadovaná spolehlivost konstrukce, která je definovaná normu ČSN EN 1990 [22] a ČSN EN 1992-1-1[23], [4].

Návrh a provedení konstrukce musí být realizováno tak, aby byla konstrukce schopna odolat proti zatížení a dalším vlivům během celé předpokládané doby životnosti. Z toho důvodu musí být konstrukce vnitřně vyztužené kompozitní výztuží navrženy s dostatečnou odolností, použitelností a trvanlivostí [4].

Aby byla dodržena požadovaná úroveň spolehlivosti konstrukce vyztužené kompozitní výztuží podle normy ČSN EN 1990 [22] musí být splněno následující: Návrh musí být proveden metodou dílčích součinitelů dle ČSN EN 1990 [22]. Zatížení musí být stanoveno v souladu s normami řady ČSN EN 1991 a v souladu s doporučením v ČSN EN 1990 pro kombinace zatížení. Vlastnosti materiálů a geometrické údaje musí respektovat údaje prezentované v ČSN EN 1990 [22]. Podle očekávané degradace působícího prostředí a omezení z hlediska působení trvalého zatížení, musí být uváženy návrhové veličiny materiálových charakteristik. Stejně jako v ČSN EN 1992-1-1 [23] platí materiálové charakteristiky betonu včetně dílčích součinitelů. Rovněž je nutné uvážit předpokládaný způsob poškození konstrukčního prvku s ohledem na volbu parciálních součinitelů spolehlivosti [4].

Při návrhu konstrukcí vyztužených FRP výztuží s ohledem na teplotu, lze rozlišit návrh s provozním teplotním zatížením, kde musí být zajištěno, aby byla provozní teplota alespoň o 30 °C nižší než teplota skelného přechodu matrice. Pokud je při návrhu uvažováno se zatížením od požáru, musí být zajištěna požadovaná požární odolnost prvku. Tu je možné zajistit sekundárními protipožárními opatřeními nebo vhodně navrženým prvkem [4].

### 9.2 Návrhová životnost staveb s kompozitní výztuží

Návrhová životnost stavby je shodně uvažována s normou ČSN EN 1990 [22], [4].

*Tabulka 6: Indikativní návrhová životnost [22]*

Kategorie návrhové životnosti	Indikativní návrhová životnost (v letech)	Příklady
1	10	Dočasné konstrukce

2	10 až 25	Vyměnitelné konstrukční části
3	25 až 50	Zemědělské a obdobné stavby, stavby pro energetiku, stožáry
4	50	Budovy a běžné stavby i jejich součásti
5	100	Mosty a jiné inženýrské konstrukce i jejich součásti
6	150	Monumentální stavby, tunely, hráze

Pro požadovanou návrhovou životnost musí být respektována doporučení a návrhové postupy zohledňující agresivní prostředí a také stálé složky zatížení FRP výztuže [4].

### 9.3 Dílčí materiálové součinitele

Aby bylo možné ověřit mezní stav únosnosti, musí být parciální součinitel betonu  $\gamma_c$  stanoven dle [23]. Pro FRP výztuž je potřebné uvážit parciální součinitel  $\gamma_f$  podle předpokládaného porušení vzorku (tlakem, tahem, smykem). Nejen hodnotu parciálního součinitele  $\gamma_f$ , ale také hodnotu dané charakteristiky je potřebné stanovit na základě statického vyhodnocení dat získaných ze zkoušek vzorků jako 0,1% kvantil daného rozdělení [4].

### 9.4 Navrhování na základě zkoušek

Návrh prvků vyztužených FRP výztuží je doporučeno podpořit zkouškami v souladu s normou ČSN EN 1990 [22], [4].

### 9.5 Stanovení minimální krycí vrstvy

Krycí betonová vrstva v prvcích vyztužených FRP výztuží pomáhá zajistit soudržnost a adekvátní ochranu proti požáru. Její tloušťku můžeme snížit, pokud nehrozí ohrožení konstrukce požárem nebo pokud je požadována menší požární odolnost betonové konstrukce. Tomu napomáhá i to, že FRP výztuž oproti ocelové, nevyžaduje ochranu oproti korozi vyvolanou vnějšími vlivy. Při návrhu tloušťky betonové krycí vrstvy je nutné zohlednit složení kompozitní výztuže, typ prvku a enviromentální podmínky. Tloušťka krycí vrstvy  $c$  má podstatný vliv na šířku trhlin, požární odolnost FRP výztuže a kotvení ovlivňující soudržnosti v betonu [4].

Pokud je průměr výztuže větší jak tloušťka krycí vrstvy, může nastat porušení betonu v příčném směru. Existuje několik směrnic, které udávají minimální tloušťku krycí vrstvy. Dle fib Bulletinu No. 40 [15] je minimální tloušťka krycí vrstvy  $c_{min}$  25-40 mm [15], [4]. Pro betonové prvky, které mají v konstrukci dočasnou funkci, můžeme při návrhu požadavek na trvanlivost, požární ochranu a tloušťku betonové krycí vrstvy omezit na zajištění soudržnosti. V prvcích s dočasnou funkcí je doporučená hodnota tloušťky krycí  $c = \max \{\phi_f, 10 \text{ mm}\}$  [4].

## 10 Návrh betonových konstrukcí vyztužených kompozitní výztuží z hlediska MSÚ

### 10.1 Návrh prvků na ohyb

Klasická výztuž vykazuje odlišné fyzikálně mechanické chování než kompozitní výztuž. Postup návrhu pro železobetonové konstrukce musíme upravit a odlišnosti tohoto materiálu při návrhu uvážit. FRP výztuž má závislé chování, proto je nutné při výpočtu posuzovat krátkodobou únosnost průřezu, ale také ověřit únosnost prvku s ohledem na dlouhodobou pevnost výztuže. Dlouhodobá pevnost v porovnání s pevností krátkodobou může být významně nižší [4]. V současné době existuje několik návrhových podkladů, které jsou pro návrh betonového prvku z FRP výztuže značně využívány. Jedná se o americkou směrnici ACI 440.1R-15 [16], kanadskou normu CSA S806-12 [17] a publikaci fib Bulletin No. 40 [15]. V této bakalářské práci je pro návrh a posouzení využívána publikace fib Bulletin No.40 [15].

#### 10.1.1 Základní předpoklady návrhu prvku vyztuženého kompozitní výztuží

Mezní stav únosnosti nastává při dosažení mezního poměrného přetvoření, alespoň v jednom materiálu (tj. mezní přetvoření  $\epsilon_{cu}$  v tlačené oblasti betonu, popřípadě mezní návrhové přetvoření ve výztuži v tahu  $\epsilon_{fu,d}$ ). Jeho výpočet vychází z následujících základních předpokladů, které jsou shodné s předpoklady uvažovanými při návrhu železobetonového průřezu [24]:

- Zachování rovinnosti průřezu i po deformaci
- Beton v tahu nepůsobí
- Zajištění dokonalé soudržnosti mezi FRP výztuží a betonem (uvážení shodnosti pro poměrné přetvoření výztuže  $\epsilon_f$  v tahu a poměrné přetvoření v přilehlých vláknech betonu  $\epsilon_c$ )
- Napětí v tlačené části průřezu se stanoví podle definovaného pracovního diagramu betonu v tlaku
- Napětí ve výztuži je uvažováno lineárně pružné až do porušení. S ohledem na působení trvalého zatížení a podmínky prostředí, je nutné při návrhu přihlídnout k omezení napětí (viz. Obrázek 14)
- Příspěvek tlakové únosnosti FRP výztuže je zanedbán (z důvodu nedostatku náležitých dat pro bezpečný návrh tlačené výztuže) [24]

Poslední dva předpoklady nám zohledňují specifika využití kompozitního materiálu při návrhu [4].

#### 10.1.2 Stanovení únosnosti ohýbaného prvku a jeho porušení

V prvku namáhaném na ohyb, může nastat porušení třemi způsoby, a to přetržením výztuže, drcením betonu nebo kombinací obou těchto případů, takzvané balanční porušení výztuže i betonu. Navržená plocha FRP výztuže v průřezu nám určuje způsob porušení. Porušení tlakem, z hlediska křehkého chování kompozitní výztuže, je žádoucí. Dochází v něm k porušení prvku drcením betonu v oblasti tlačených vláken. Toho lze dosáhnout, pokud je skutečné vyztužení větší než vyztužení v balančním stavu. Záslouhou nižšího modulu pružnosti FRP výztuže ve srovnání s klasickou ocelovou výztuží souběžně dochází v tažené oblasti k viditelnému rozvoji trhlin. Porušení tahem je náhlé a dojde v něm k přetržení kompozitní výztuže. Toho lze dosáhnout, pokud je skutečná plocha vyztužení menší než balanční plocha

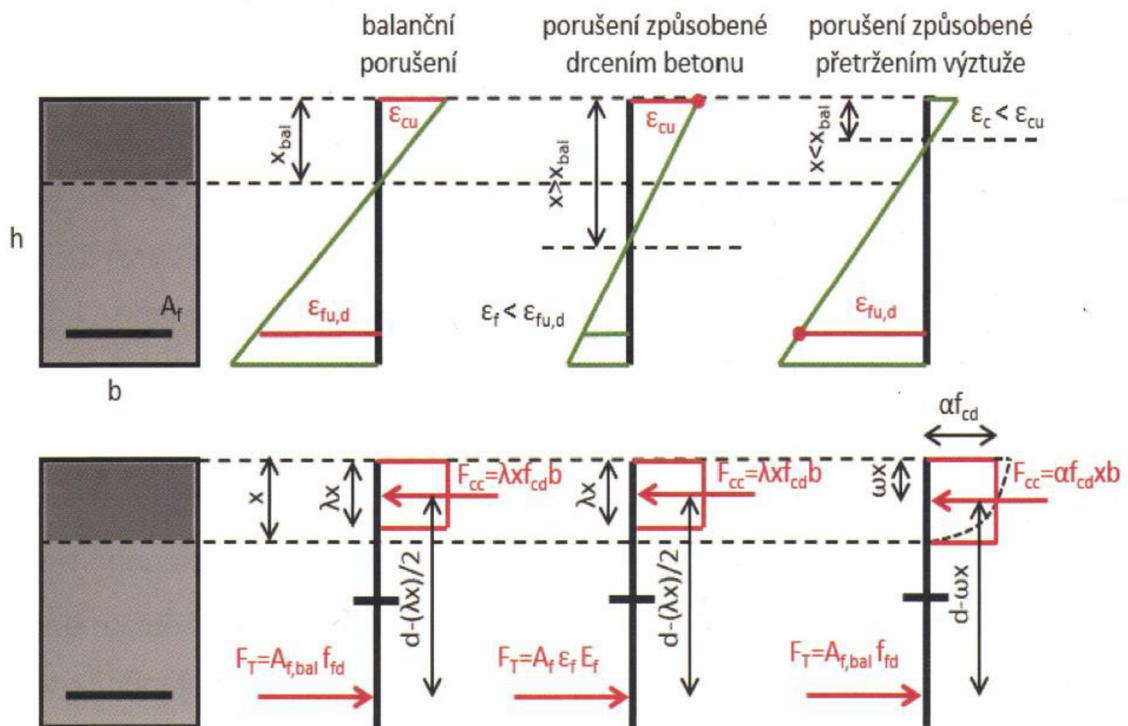
vyztužení. Mezního přetvoření není dosaženo  $\varepsilon_{cu}$  v krajních vláknech tlačенého betonu. Pro tento typ porušení musí být zajištěna vyšší míra bezpečnosti návrhu [24].

Vztah pro určení balanční polohy neutrální osy vychází z předpokladu rovinnosti průřezu po deformaci a uvážení mezních přetvoření v obou materiálech [24].

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu,d}} d \quad (10-1)$$

$d$  = účinná výška průřezu,  $\varepsilon_{cu}$  = mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku,  $\varepsilon_{fu,d}$  = návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření FRP výztuže v tahu [24].

Určení způsobu porušení průřezu můžeme pomocí skutečně navržené plochy FRP výztuže  $A_f$  ve srovnání s balanční plochou vyztužení  $A_{f,bal}$  (je předpokládána rovnováha sil na průřezu, lze ji určit výpočtem). Při určení balanční plochy vyztužení je možné použít rovnoměrné rozdělení napětí v tlačené části průřezu, neboť je v krajních vláknech průřezu dosaženo mezního přetvoření [4]. Toto chování lze vidět na obrázku níže.



Obrázek 16: Průběh přetvoření a napětí po výšce průřezu [4]

### 10.1.3 Publikace fib Bulletin No.40 [15]

#### 10.1.3.1 Stanovení krátkodobé návrhové únosnosti

Návrhová pevnost FRP výztuže v tahu  $f_{fd}$  je určena pomocí charakteristické tahové pevnosti dle vztahu [4], [15]:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (10-2)$$

Pro všechny typy vláken je součinitel  $\gamma_f = 1,25$ . Charakteristickou hodnotu tahové pevnosti uvažujeme jako 5% kvantil normálního rozdělení. V krátkodobé pevnosti neuvažujeme s vlivem okolního prostředí. K zohlednění okolního prostředí dochází až při stanovení dlouhodobé únosnosti [4], [15].

#### 10.1.4 Mezní únosnost v ohybu

##### 10.1.4.1 Vlastnosti

Průřez vyztužený klasickou ocelovou výztuží je založen na dvou základních předpokladech [15]:

- Zachování rovinnosti průřez po deformaci
- Mezi výztuží a betonem je perfektní vazba, která zajišťuje kompatibilitu přetvoření podél průřezu

Pomocí těchto předpokladů lze stanovit ohybovou únosnost průřezu s FRP výztuží. Pokud dojde k zhoršení vazby mezi výztuží a betonem, může dojít k neplatnosti těchto předpokladů. Z tohoto důvodu musí být uvažována FRP výztuž s odpovídajícími charakteristikami [15].

Musíme rozlišovat mezi dvěma způsoby porušení v betonu. Takzvaným drcením betonu a prasknutí výztuže, viz podkapitola 10.1.2. V publikace *fib Bulletin No. 40* [15], je uveden výpočet balančního stupně vyztužení  $\rho_{fb}$  [15].

##### 10.1.4.2 Momentová odolnost prvků vyztužených FRP výztuží

Pomocí Eurocodu-2 lze stanovit mezní únosnost průřezu vyztuženého FRP výztuží. S únosností FRP výztuže v tlaku neuvažujeme [15].

###### 10.1.4.2.1 Tlakové porušení

Pokud je stupeň vyztužení  $\rho_f$  větší, jak balanční stupeň  $\rho_{fb}$ , dochází k porušení ohybu pomocí drcení betonu a mezní moment únosnosti  $M_u$  lze vyjádřit [15]:

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \left(1 - \frac{\lambda \xi}{2}\right) \quad (10-3)$$

Kde  $\eta$  = součinitel tlakové pevnosti v betonu,  $f_{cd}$  = návrhová hodnota pevnosti v tlaku,  $b$  = šířka průřezu,  $d$  = účinná výška,  $\lambda$  = součinitel definující efektivní výšku tlačené oblasti betonu,  $\xi$  = poměrná výška tlačené části průřezu za předpokladu lineárního průběhu přetvoření

Kde  $\xi$  určíme:

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}} \quad (10-4)$$

#### 10.1.4.2.2 Tahové porušení

Pokud je stupeň vyztužení FRP výztuže nižší, jak balanční, dochází k porušení přetržením. Abychom stanovili moment únosnosti  $M_u$ , musíme stanovit přetvoření v krajních tlačných vláknech  $\varepsilon_c$ . Toho lze dosáhnout i pomocí interakčního řešení. Mezní moment únosnosti lze vyjádřit [15]:

$$M_u = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f} \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \quad (10-5)$$

Kde  $A_f$  = navržená plocha FRP výztuže,  $f_{fk}$  = charakteristická hodnota pevnosti výztuže v tahu  $\gamma_f$  = materiálový součinitel  $\xi$  = poměrná výška tlačené části průřezu za předpokladu lineárního průběhu přetvoření

Kde  $\xi$  určíme:

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_c} \quad (10-6)$$

### 10.2 Smyk

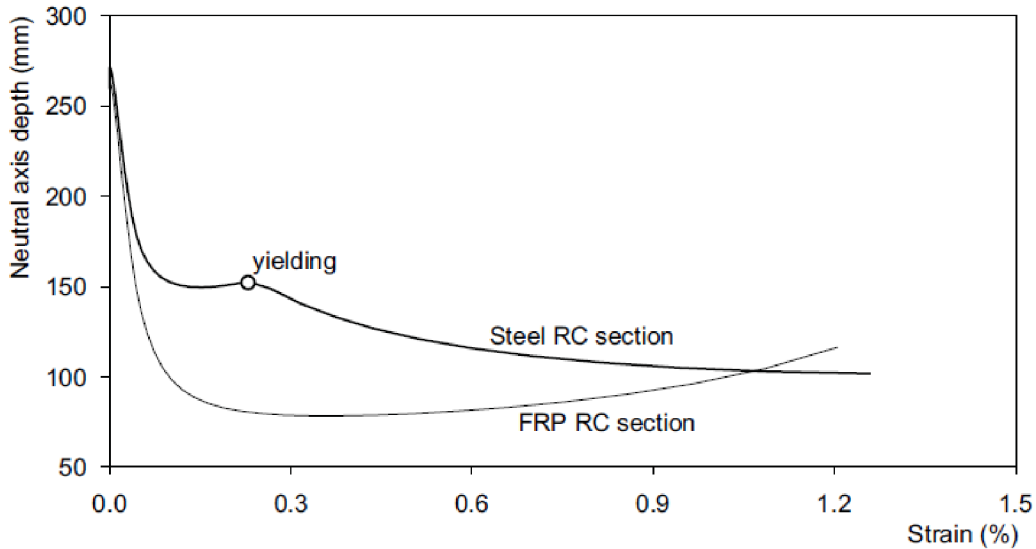
Smykovou únosnost nám zejména ovlivňuje tlačená část betonového průřezu, smyková výztuž a hmoždinkový účinek kameniva a podélné výztuže. To závisí na vlastnostech betonu, mechanických charakteristikách výztuže a na spolupůsobení betonu a výztuže [15].

U kompozitní výztuže nám přenos smykového namáhání na prvků ovlivňují mechanické vlastnosti. Ve výpočtu nemůžeme uvažovat s přerozdělováním napětí na konstrukci z důvodu absence plastického chování kompozitní výztuže, které vede ke křehkému porušení. Nesmíme opomenout zohlednit specifické chování FRP výztuže jako odlišné vlastnosti v různých směrech namáhání, redukce únosnosti v ohybu třmíneků, apod. Důležité je uvažovat chování kompozitní výztuže při kombinaci podélných a příčných sil [4], [15].

#### 10.2.1 Mechanismus přenosu smykového napětí u elementu vyztuženého kompozitní výztuží

##### 10.2.1.1 Výška tlačené části průřezu

Pro stanovení smykové únosnosti má zásadní úlohu výška tlačené části průřezu, ta je závislá na vlastnostech podélné výztuže. Tudiž lze očekávat, že smyková únosnost prvku s podélnou FRP výztuží bude rozdílná od smykové únosnosti železobetonového prvku. Na Obrázek 17 je vyobrazena závislost výšky tlačené části průřezu na přetvoření podélné výztuže [15].

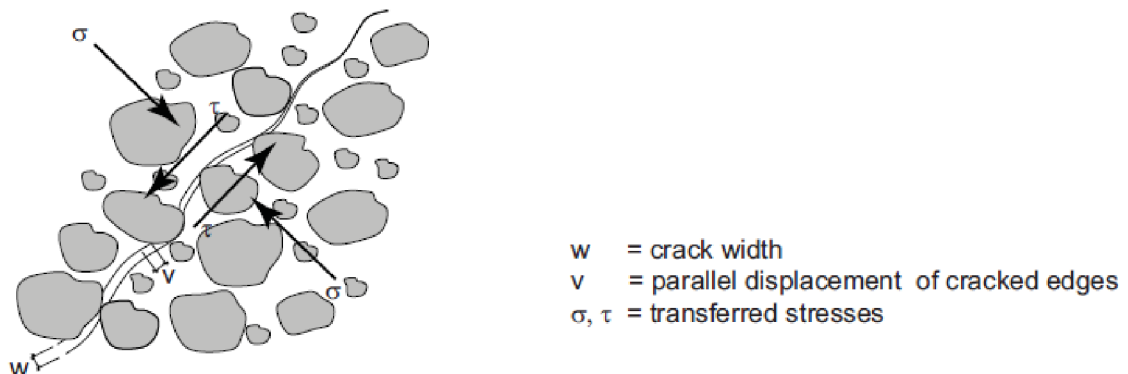


Obrázek 17: Závislost polohy neutrální osy na přetvoření výztuže u prvků o stejném průřezu a ploše podélné výztuže [15]

Z obrázku je patrné, že oproti železobetonovému prvku při poměrně nízkých hodnotách zatížení je u prvku s FRP výztuží plocha tlačené části průřezu po vytvoření trhliny výrazně menší. Při zvyšování přetvoření výztuže se plocha tlačené části průřezu s FRP výztuží tolik nezmenší jako v případě prvku vyztuženého ocelovou výztuží. Z důvodu nelinearit mechanických charakteristik betonu v tlaku se plocha tlačené části průřezu při tlakovém namáhání zvětšuje a tím méně je ovlivněna smyková únosnost. Smyková únosnost prvku s podélnou výztuží po vzniku trhlin je menší než u prvku, který je vyztužen klasickou betonářskou výztuží. Snížení únosnosti se projevuje méně díky zvyšující se deformaci podélné výztuže [15].

#### 10.2.1.2 Hmoždinkový účinek kameniva

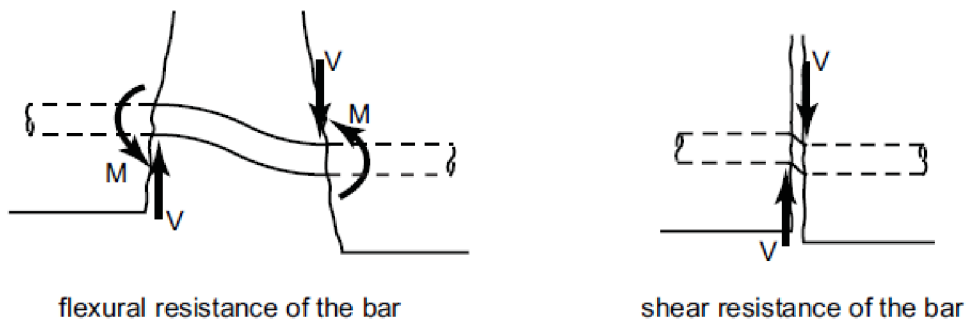
Jestliže dojde ke smykovému posunu rovnoběžnému se směrem trhliny, přenos smykového napětí přes vzniklou trhlinu v tažené části průřezu zajišťuje hmoždinkový účinek kameniva. Ten se snižuje, pokud nám roste šířka trhliny. Oproti železobetonovému prvku, u prvku vyztuženého FRP výztuží je očekáván větší průhyb a širší trhliny z důvodu nízkého modulu pružnosti. Proto můžeme čekat nižší příspěvek hmoždinkového účinku kameniva u prvku s FRP výztuží než u prvku s ocelovou výztuží [15].



Obrázek 18: Přenos sil přes trhlinu pomocí hmoždinkového účinku kameniva [15]

### 10.2.1.3 Hmoždinkový účinek výztuže

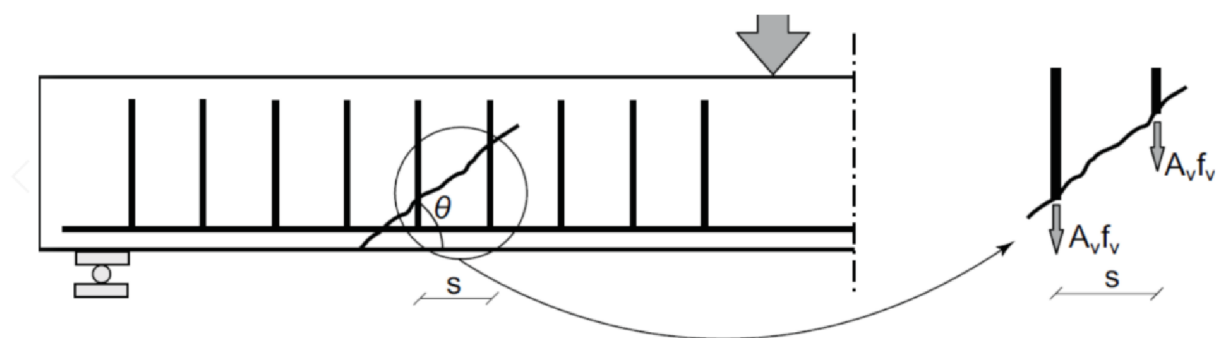
Pro přenos smyku je příspěvek hmoždinkového účinku výztuže nízký, a to z důvodu nízké příčné tuhosti FRP výztuže [4].



Obrázek 19: Hmoždinkový účinek výztuže přes trhlinu [15]

### 10.2.1.4 Smyková výztuž

Ve chvíli, kdy zatížení překročí únosnost betonu ve smyku, je potřeba navrhnout příčnou výztuž. Ta umožňuje přenos tahových sil přes vzniklou smykovou trhlinu, většinou je ve formě třmínků (Obrázek 20). Smyková výztuž je využívána jen pro přenos tahových sil v prvku a podíl její únosnosti z celkové smykové únosnosti prvku závisí na maximálním napětí, které je výztuž schopna přenést. U klasické betonářské výztuže je toto napětí rovno napětí na mezi kluzu výztuže. K významnému omezení tahové pevnosti FRP výztuže dochází při působení kombinace normálového a smykového napětí a je závislá na přetvoření výztuže. V místě ohybu/ rohů třmínků dochází ke snížení tahové únosnosti FRP výztuže. Pokles únosnosti závisí na poměru délky ohybu vůči poloměru ohybu, typu kompozitní výztuže, soudržných vlastnostech a typu kotvení. V publikaci *fib* Bulletin no.40 [15] je uvedeno návrhové doporučení, a to použít maximální pevnost rovnou 40% - 50% jednoosé pevnosti kompozitu (Obrázek 15) [15].



Obrázek 20: Podíl smykové výztuže na celkové smykové únosnosti prvku [15]

### 10.2.2 Smykové porušení v prvcích vyztužených FRP výztuží

Selhání vyztuženého betonového prvku při působení smyku vždy předchází vytvoření smykových trhlin. Vznik smykových trhlin má za příčinu změnu chování prvku a k poruše může dojít současně při tvorbě nových nebo prodlužujících se smykových trhlin, či zvýšeného zatížení. Mimo typický způsob porušení jako u železobetonového prvku (porušení tahem,



tlakem) může dojít u prvku s FRP výztuží k porušení smykové výztuže. Porušení ve smyku při drcení betonových vzpěr je mechanismus porušení, závislý jen na určitých charakteristikách betonu. Postup výpočtu pro prvky s FRP výztuží je tedy shodný s postupem pro prvky vyztužené ocelovou výztuží [15].

### 10.2.3 Přístup k návrhu prvků při smykovém namáhání

Chování prvků vyztužených FRP výztuží lze popsat pomocí příhradové analogie, stejně jako chování prvku vyztuženého klasickou ocelovou výztuží. S jediným rozdílem, a to že pro prvky s FRP výztuží tato skutečnost platí v omezené míře. FRP výztuž je křehký materiál, problematické je u ní uvažovat s redistribucí napětí. Podle publikace *fib* Bulletin no.40 [15], při kontrole šířky smykové trhliny a tím i přetvoření v kompozitní výztuži, lze použít metodu příhradové analogie. Je zde také uvedeno, že smykovou únosnost betonu a výztuže lze sečíst. Publikace [15] dále uvádí, že po provedení experimentálních testů na trámech a deskách, bylo prokázáno, že pro prvky vyztužené FRP výztuží můžeme smykovou únosnost určit pomocí postupu odvozeného z výpočtu smykové únosnosti pro prvky vyztužené klasickou ocelovou výztuží. Je však nutné zohlednit nižší tuhost FRP výztuže na rozdíl od ocelové výztuže [15]. ČSN EN 1992-1-1 [23] požaduje při překročení únosnosti betonu ve smyku, aby veškerou smykovou sílu přenášela jen smyková výztuž [4].

### 10.2.4 Prvky bez smykové výztuže

Publikace *fib* Bulletin no.40 [15] uvádí, že smyková únosnost prvku s podélnou kompozitní výztuží bez smykové výztuže můžeme určit pomocí postupu odvozeného z výpočtu smykové únosnosti prvku vyztuženého klasickou betonářskou výztuží podle teorie ČSN EN 1992-1-1 [23], [4]. Výpočet s FRP výztuží tedy vede k stejně bezpečnému návrhu jako s ocelovou výztuží, pokud jsou při návrhu uvažovány stejné deformace podélné výztuže  $\varepsilon_w = \varepsilon_s$  a také stejné návrhové síly  $F_f = F_s$ . Sílu ve výztuži lze zapsat [15]:

$$F_f = \varepsilon_f \cdot E_f \cdot A_f = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = F_s \quad (10-7)$$

$F_f$  = síla v podélné kompozitní výztuži,  $F_s$  = síla v podélné ocelové výztuži,  $\varepsilon_f$  = deformace podélné kompozitní výztuže,  $\varepsilon_s$  = deformace podélné ocelové výztuže,  $E_f$  = modul pružnosti kompozitní výztuže,  $E_s$  = modul pružnosti ocelové výztuže,  $A_f$  = plocha podélné kompozitní výztuže,  $A_s$  = plocha podélné ocelové výztuže

Za předpokladu  $\varepsilon_w = \varepsilon_s$  (z poměru pružnosti obou materiálů), je možné ve výpočtu uvažovat náhradní plochu  $A_e$  [4], [15]:

$$A_e = A_f \frac{E_f}{E_s} \quad (10-8)$$

Tuto náhradní plochu lze použít pro návrh nebo lze zavést korekční podmínku zohledňující různé normálové tuhosti podélné výztuže při výpočtu smykové únosnosti betonu. Publikace [15] předkládá upravený vztah, který je v souladu s normou ČSN EN 1992-1-1 [23], [4]:

$$V_{cf} = 0,12 \cdot k \left( 100 \frac{A_f}{b_w \cdot d} \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot \varphi_\varepsilon \cdot f_{ck} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \quad (10-9)$$

$k$ =součinitel výšky průřezu:

$$k = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}\right); k \leq 2,0 \quad (10-10)$$

$A_f$  = plocha navržené podélné kompozitní výztuže, která je od místa posuzovaného svislého řezu protažena alespoň o délku  $d$ ;  $E_f$  = modul pružnosti kompozitní výztuže;  $E_s$ =modul pružnosti ocelové výztuže;  $f_{ck}$  = charakteristická válcová pevnost betonu;  $b_w$  = nejmenší šířka průřezu v jeho tahové oblasti;  $d$  = účinná výška průřezu.

Součinitel  $\phi_\varepsilon$  zohledňuje přípustné vyšší přetvoření v kompozitní výztuži [4]:

$$\phi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{fw}}{\varepsilon_y} \quad (10-11)$$

Publikace [15] uznává limitní hodnotu  $\varepsilon_{fw} = 0,0045$ . V porovnání s hodnotou  $\varepsilon_y$  = přetvoření na mezi kluzu, je dvojnásobná.

#### 10.2.5 Prvky se smykovou výztuží

Množství potřebné smykové výztuže závisí podle maximálního přípustného přetvoření  $\varepsilon_{fw,lim}$ . Ve starších publikacích lze nalézt doporučení, že by mělo být uvažováno maximální přetvoření FRP výztuže  $\varepsilon_{fw}$  shodné s mezí kluzu ocelové výztuže. Hlavně z důvodu zachování celistvosti průřezu po vytvoření smykových trhlin. Nynější publikace zavádí méně tradiční návrh. Ten uvažuje vyšší hodnoty maximálního poměrného přetvoření smykové FRP výztuže. Ta je bližší skutečnému chování prvku vyztuženého tímto druhem výztuže (Obrázek 21) [4].

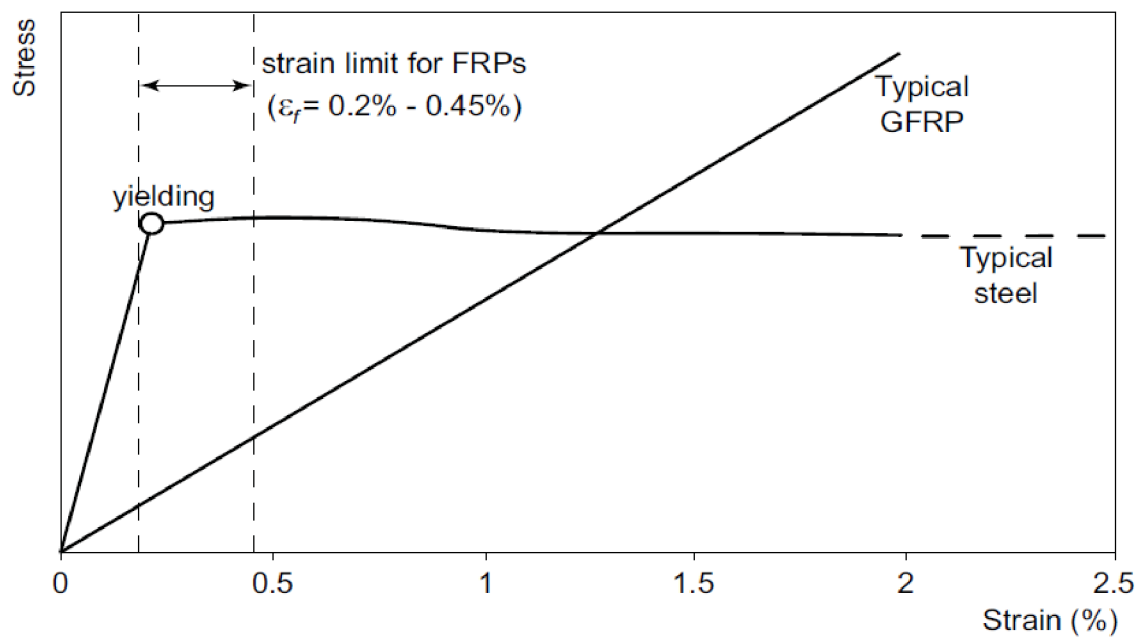
Smykovou únosnost příčné smykové výztuže lze vyjádřit bez součinitelů vlivu prostředí a dlouhodobého zatížení:

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw} \cdot f_{fL,d}^b \cdot z}{s} \quad (10-12)$$

$A_{fw}$ = plocha jednoho FRP třmínku;  $f_{fL,d}^b$  = redukováná výpočtová tahová únosnost FRP výztuže v místě ohybu;  $s$  = podélná vzdálenost třmínků;  $z$  = rameno vnitřní síly.

Podle publikace [15] je při výpočtu smykové výztuže doporučený úhel tlakové diagonály  $\phi=45^\circ$  [4].

Vlivem snížení únosnosti výztuže v ohybech třmínků je zavedena redukce tahové únosnosti FRP výztuže. Z hlediska rozvoje trhlin je nutné limitovat tuto únosnost mezním přípustným přetvořením. V současnosti velikost omezení přetvoření způsobuje největší rozdíl v nutné ploše smykové výztuže určené podle různých předpisů [4].



Obrázek 21: Limitní přetvoření smykové FRP výztuže uvažované c současných normách [15]

## 11 Závěr

Tématem této bakalářské práce bylo obeznámení se s kompozitní výztuží. Od jejího uplatnění se v různých koutech světa, přes její složení, fyzikálně mechanické vlastnosti, trvanlivost, tak i po návrh jejího mezního stavu únosnosti. Složení kompozitní výztuže bylo rozebráno jak podle typu matrice a vláken, tak i podle typu jejich odlišných vlastností.

Výpočtová část práce, která navazuje na část teoretickou se zabývala návrhem prefabrikovaného dílce tvaru U, který je uvažován jako část energokanálu. Provedený statický výpočet obsahuje dvě varianty řešení. První varianta je návrh s ocelovou výztuží, druhá varianta je návrh s kompozitní výztuží. Pro obě varianty je uvažován stejný tvar a rozměr prefabrikovaného dílce. Ze statického výpočtu lze vidět odlišný přístup k posuzování prvku z kompozitní výztuže oproti prvku s ocelovou výztuží. Jednou z výhod prvku s FRP výztuží je patrná nižší krycí vrstva, jeho nevýhodou však je horší ohybatelnost výztuže. Z výkresové dokumentace, která vyplývá ze statického výpočtu je patrná nižší hmotnost kompozitní výztuže než u prvku s ocelovou výztuží.

## Seznam literatury

- [1] КУЗЕВАНОВ, Дмитрий Владимирович. *Конструкции с композитной неметаллической арматурой. Обзор и анализ зарубежных и отечественных нормативных документов* [online]. Moskva, 2012 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <http://fordewind.org/wiki/lib/exe/fetch.php?media=img:nka2012.pdf>. Vědecko-technická zpráva.
- [2] ЯРОСЛАВСКИЙ ЗАВОД КОМПОЗИТОВ. *История* [online]. 2021 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://yazk.ru/products/armatura-kompozitnaya/istoriya/>
- [3] ГОСТ 31938-2012. *Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия (с Поправкой)*. 2014.
- [4] BENKO, Vladimír, Juraj BILČÍK, Natália GAŽOVIČOVÁ, František GIRGLE, Ondřej JANUŠ, Ivan HOLLÝ, Anna MATUŠÍKOVÁ, Jan POKEŠ, Petr ŠTĚPÁNEK. *Navrhování betonových konstrukcí s FRP výztuží*. Brno, 2017.
- [5] БАЙКАЛ КОМПОЗИТ. *Стеклопластиковая композитная арматура* [online]. In: . 2020 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://baikalcompozit.ru/>
- [6] СТЕПАНОВА, В. Ф., А. Ю. СТЕПАНОВ а Е. П. ЖИРКОВ. *Арматура композитная полимерная*. Moskva, 2013. УДК 691.175.3.
- [7] ПЛАСТОСНОВА. *Готовый стеклоровинг в бухтах* [online]. In: . [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://plastosnova.ru/syre/stekloroving/gotovyj-stekloroving-v-buxtax/>
- [8] НАНО-СК. *Базальтовый ровинг* [online]. In: . [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://nano-sk.ru/bazaltovyj-roving/>
- [9] ЛАЗЕРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ. *Углеродное волокно* [online]. In: . [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://lasercomponents.ru/product/uglerodnoe-voлокno/uglerodnoe-voлокno/uglerodnoe-voлокno/>
- [10] QUALFIBER. *Арамидное волокно Термостойкая параарамидная нить* [online]. In: . [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.qualfiber.com/ru/aramid-fiber-high-temperature-resistant-para-aramid-filament-800d-product/>
- [11] ИМОМНАЗАРОВ, Т.С., М.Х ДИРИЕ а М.Х. ДИРИЕ. ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ. *Системные технологии*. 2018, **2018**((№27), 24-28. УДК 669.018-419.8(035).
- [12] КАЗАКОВ, Илья Александрович. *Разработка технологии непрерывного формования осесимметричных композитных изделий методом пултрузии*. Moskva, 2016, 186 s. Disertační. Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева. Vedoucí práce Красновский А.Н.
- [13] КРАСНОВСКИЙ, А. Н. а И. А. КАЗАКОВ. Моделирование отверждения композитной арматуры в процессе производства безфильерным методом. *Дизайн. Материалы. Технология*. 2015, (5 (40), 35-40. УДК 678.539.
- [14] GIRGLE, František, Jan POKEŠ, Ondřej JANUŠ, Vojtěch KOSTIHA а Petr ŠTĚPÁNEK. КОМПОЗИТНÍ ВÝЗТУŽ DO BETONU – PERSPEKTIVNÍ MATERIÁL PRO ODOLNÉ A TRVANLIVÉ BETONOVÉ KONSTRUKCE. *Beton TKS* [online]. 2017, (2), 50-55 [cit. 2021-03-26]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-2-5 0 0.pdf>
- [15] FIB BULLETIN NO. 40. *FRP reinforcement in RC structures: Technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for*

- concrete structures. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [16] ACI 440.1R-15. *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. American Concrete Institute, 2015. ISBN 978-1-942727-10-1.
- [17] CSA S806-12: *Design and construction of building structures with fibereinforced polymers*. Canadian Standards Association, 2012. ISBN 978-1-55491-931-4.
- [18] JANUŠ, Ondřej, František GIRGLE, Vojtěch KOSTIHA, Petr ŠTĚPÁNEK, Pavel ŠULÁK a Mohamad MASOUR. VLIV POVRCHOVÉ ÚPRAVY A ZKUŠEBNÍ KONFIGURACE NA SOUDRŽNOST VNITŘNÍ GFRP VÝZTUŽE. *Beton TKS* [online]. 2018, (3), 51-57 [cit. 2021-03-27]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2018-3-51.pdf>
- [19] ГИДФУНДАМЕНТ. *Технические характеристики и сферы применения стеклопластиковой арматуры: Ребристые и гладкие стержни* [online]. In: . 2021 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://gidfundament.ru/armatura/stekloplastikovaya-tehnicheskii-harakteristiki.html>
- [20] GIRGLE, František, Ondřej JANUŠ, Vojtěch KOSTIHA, Lenka BODNÁROVÁ, Petr ŠTĚPÁNEK, Martin ZLÁMAL, Ďorđe ČAIROVIĆ a Mohamad MANSOUR. DLOUHODOBÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE PŘI APLIKACI V BETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH. *Beton TKS* [online]. 2019, (2), 38-45 [cit. 2021-03-29]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: <https://www.betontks.cz/sites/default/files/2019-2-38.pdf>
- [21] NAĎ, Ľudovít a Anton BAJZECER. ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TYČÍ GFRP Z HLADISKA ICH POUŽITEĽNOSTI AKO PREDPÍNACÍCH JEDNOTIEK V BETÓNOVÝCH NOSNÍKOCH. *Beton TKS* [online]. 2006, (4), 47-61 [cit. 2021-04-5]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2006-4-47\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2006-4-47_0.pdf)
- [22] ČSN 1190:2004 (73 0002); Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.
- [23] ČSN EN 1992-1-1: 2006 (73 1201); Eurokód: Navrhování betonových konstrukcí - část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [24] GIRGLE, František, Ondřej JANUŠ, Anna MATUŠÍKOVÁ a Petr ŠTĚPÁNEK. NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH PRVKŮ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITNÍ VÝZTUŽÍ – NÁVRH NA OHYB. *Beton TKS* [online]. 2017, (3), 54-59 [cit. 2021-4-13]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: [https://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-3-54\\_0.pdf](https://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-3-54_0.pdf)
- [25] HALFEN DEHA KKT KUGELKOPFTRANSPORTNKERSYSTEM Produktinformation Technik [Online]. Dostupné z: [https://downloads.halfen.com/catalogues/de/media/catalogues/liftingsystems/KKT\\_Leviat\\_20-E.pdf](https://downloads.halfen.com/catalogues/de/media/catalogues/liftingsystems/KKT_Leviat_20-E.pdf)
- [26] ČSN EN 206+A1 (73 2403): Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [27] Schöck Bauteile GmbH: Schöck Cobar, Technical Information. [Online]. Dostupné z: [https://www.schoeck.com/view/5470/Technical Information Schoeck Combar %5 B5470%5D.pdf](https://www.schoeck.com/view/5470/Technical%20Information%20Schoeck%20Combar%20B5470%5D.pdf)
- [28] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – část 1-1: Obecná zatížení – objemové tíhy, vlastní tíha a užitné zatížení staveb.
- [29] ČSN EN 730037: Zemní tlak na stavební konstrukce

[30] ČSN EN 73 1004: Navrhování základových konstrukcí – Stanovení požadavků pro výpočetní metody

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Výztuž .....	13
Obrázek 2: Porovnání mechanických charakteristik některých druhů vláken .....	14
Obrázek 3: Hotový skleněný roving v roli (svitku) .....	14
Obrázek 4: Čedičový roving .....	15
Obrázek 5: Uhlíkové vlákno .....	16
Obrázek 6: Aramidové vlákno .....	16
Obrázek 7: Charakteristické typy průřezu prutů kompozitní výztuže .....	17
Obrázek 8: Schéma procesu pultruze a nidltruze.....	19
Obrázek 9: Vnější vzhled pultruze .....	20
Obrázek 10: Příklad idealizované závislosti napětí na přetvoření GFRP výztuže včetně základních materiálů kompozitu .....	21
Obrázek 11: FRP výztuž a její osy 1 (l)-podélná osa, 2 (r) a 3(r)-příčná osa.....	22
Obrázek 12: Povrchově upravené výztuže .....	25
Obrázek 13: Křivka přetvoření během dotvarování .....	27
Obrázek 14: Idealizovaný návrhový diagram FRP výztuže pro tahovou pevnost .....	27
Obrázek 15: Pevnost v ohybu GFRP výztuže $\varnothing$ 16 mm vystavené působení alkalickému prostředí .....	31
Obrázek 16: Průběh přetvoření a napětí po výšce průřezu .....	36
Obrázek 17: Závislost polohy neutrální osy na přetvoření výztuže u prvků o stejném průřezu a ploše podélné výztuže.....	39
Obrázek 18: Přenos sil přes trhlinu pomocí hmoždinkového účinku kameniva .....	39
Obrázek 19: Hmoždinkový účinek výztuže přes trhlinu .....	40
Obrázek 20: Podíl smykové výztuže na celkové smykové únosnosti prvku .....	40
Obrázek 21: Limitní přetvoření smykové FRP výztuže uvažované c současných normách.....	43



## Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické vlastnosti kompozitní a kovové výztuže .....	18
Tabulka 2: Typické hustoty při $V_f=0.5$ až $0.75$ .....	22
Tabulka 3: Koeficient tepelné roztažnosti pro ocel, beton a FRP výztuž (při $V_f=0.5$ až $0.75$ ) .....	22
Tabulka 4: Tahové charakteristiky (při $V_f=0.5$ až $0.75$ ) .....	24
Tabulka 5: Stanovení dlouhodobé návrhové pevnosti dle různých návrhových podkladů.....	28
Tabulka 6: Indikativní návrhová životnost.....	33